



HAL
open science

Méthodologie de calcul du débit du droit d'eau fondé en titre

David Dorchies

► **To cite this version:**

David Dorchies. Méthodologie de calcul du débit du droit d'eau fondé en titre. irstea. 2017, pp.100.
hal-02607109

HAL Id: hal-02607109

<https://hal.inrae.fr/hal-02607109v1>

Submitted on 16 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



**AGENCE FRANÇAISE
POUR LA BIODIVERSITÉ**

ÉTABLISSEMENT PUBLIC DE L'ÉTAT

Programme 2016/2018

Thème Gestion équilibrée de la ressource en eau

Action n°31

Méthodologie de calcul du débit du droit d'eau fondé en titre

Rapport

David Dorchies (Irstea)

Septembre 2017



AUTEURS

David DORCHIES, Ingénieur en hydraulique et informatique (Irstea), david.dorchies@irstea.fr

CORRESPONDANTS

Claire MAGAND, chargée de mission ressources en eau et changement global, Direction de la Recherche, Expertise et Développement des Compétences (AFB), claire.magand@afbiodiversite.fr

Dominique BARIL, Adjoint au Directeur du contrôle des usages, Chef du Pôle ingénierie d'appui technique (AFB), dominique.baril@afbiodiversite.fr

Dominique Courret, chargé de mission au Pôle Ecohydraulique AFB - IMFT, Direction de la Recherche, Expertise et Développement des Compétences (AFB), dominique.courret@afbiodiversite.fr

AUTRES CONTRIBUTEURS

Cyril DEJEAN, Ingénieur d'étude (Irstea), cyril.dejean@irstea.fr

Pierre LE FAUCHEUX, Ingénieur d'étude (Irstea), pierre.le-fauchoux@irstea.fr

Droits d'usage : Accès libre

Niveau géographique : national

Couverture géographique : France

Niveau de lecture : professionnels, experts



RÉSUMÉ

Les droits d'eau fondés en titre (droits d'eau antérieurs à 1789 et non soumis à déclaration et autorisation) font régulièrement l'objet de contentieux concernant l'évaluation du débit effectivement dérivable lors de l'instauration du droit d'eau. Les méthodes de calcul utilisées dans les référés des propriétaires et dans les jugements rendus sont souvent très approximatives voire totalement inexactes.

L'objectif de cette méthodologie est d'établir une méthodologie de calcul plus proche des réalités hydrauliques, répondant à la typologie des situations rencontrées pour ce type d'aménagement, et susceptibles d'être utilisée par les services de l'État pour justifier les décisions administratives.

Après avoir présenté les définitions concernant le droit fondé en titre et la consistance légale, la méthodologie présente trois démarches de détermination du débit maximum dérivable :

- utilisation de données issues de documents historiques ;
- mesure in situ du débit de l'installation ;
- calcul du débit maximal dérivable à partir de la cote normale de fonctionnement de l'installation, de sa topologie et de ses caractéristiques physiques.

Cette dernière méthode donne tout d'abord les clés permettant de déterminer la position de la section contrôlant le débit maximal ainsi que la méthode de calcul associée à cette position. Une méthode générique, en cas de non détermination de la section de contrôle, est aussi présentée.

Le chapitre suivant expose les différentes formules théoriques de l'hydraulique à utiliser pour calculer les différents éléments entrants dans les méthodes de calcul : régime critique, régime uniforme, courbe de remous, déversoirs et orifices.

Des mises en pratique sur des cas réels viennent enfin illustrer les méthodes proposées.

MOTS-CLÉS (THÉMATIQUE ET GÉOGRAPHIQUE)

Droit fondé en titre, moulin, hydroélectricité, débit, consistance légale



METHODOLOGY FOR CALCULATING THE FLOW OF FULL WATER RIGHTS

ABSTRACT

Full water rights (water rights prior to 1789 and not subject to declaration and authorization) are regularly the subject of conflicts concerning the assessment of the diverted flow during the establishment of the water rights. The methods of calculation used in the requests of the owners and in the judgments rendered are often very approximate or even totally inaccurate.

The objective of this methodology is to establish a methodology of calculation closer to the hydraulic realities, responding to the typology of the situations encountered for this type of development, and which can be used by the services of the State to justify the Administrative decisions.

After presenting the definitions concerning the full water right and the legal consistency, the methodology presents three approaches for determining the maximum derivable flow :

- use of data from historical records ;
- in situ measurement of the flow rate of the installation ;
- calculation of maximum diverted flow from the normal operating water elevation of the installation, its topology and its physical characteristics.

The latter method first provides the keys for determining the position of the section controlling the maximum flow rate and the method of calculation associated with this position. A generic method, in case of non-determination of the control section, is also presented.

The following chapter describes the various hydraulics theoretical formulas to be used to calculate the different elements of the calculation methods : critical regime, uniform regime, backwater curve, weirs and orifices.

Practical implementations on real cases finally illustrate the proposed methods.

KEY WORDS (THEMATIC AND GEOGRAPHICAL AREA)

full water rights, mill, hydroelectricity, flow, legal consistency

Table des matières

1	Introduction	8
1.1	Pourquoi ce guide méthodologique ? A qui s'adresse-t-il ?	8
1.2	Qu'est-ce qu'un droit fondé en titre ?	8
1.3	Qu'est-ce que la consistance légale ?	9
1.4	Comment différencier la puissance maximale brute de la puissance nette ?	10
1.5	Ambiguïtés autour de la définition de la consistance légale et jurisprudence	11
1.5.1	L'arrêt Ulrich	11
1.5.2	Confusion entre puissance nette et débit maximum dérivable	11
1.5.3	Cas de plusieurs moulins sur une seule dérivation	12
1.6	Comment définir le débit maximum dérivable ?	12
2	Évaluation du débit maximal dérivable à partir des données historiques	14
2.1	Principe de la méthode	14
2.2	Définition de la puissance nette	14
2.2.1	Formule de la puissance nette	14
2.2.2	Hauteur de chute nette	15
2.2.3	Rendement total du moulin	15
2.3	Calcul du débit dérivé à partir de la puissance nette	17
2.4	Position de la jurisprudence concernant les données historiques	17
2.4.1	Cas des décisions administratives passées	17
2.4.2	Cas des états statistiques et des capacités de production	18
3	Évaluation du débit maximal dérivable à partir de mesures de débit	20
3.1	Quand appliquer cette méthode ?	20
3.2	Quelles techniques de mesure employer ?	20
3.3	Utiliser la mesure de débit pour la modélisation	21
4	Évaluation du débit maximal dérivable par modélisation	22
4.1	Définition de la section de contrôle hydraulique	22
4.1.1	Les localisations possibles de la section de contrôle	22
4.1.2	Les régimes d'écoulement en hydraulique à surface libre	23
4.1.3	Comment se caractérise une section de contrôle ?	24
4.2	Comment trouver la section de contrôle ?	25
4.2.1	Méthode de recherche de la section de contrôle	25
4.2.2	Que faire si la section de contrôle n'est pas facilement identifiable ?	26
4.3	Méthodes de calcul du débit maximum dérivable en fonction de la localisation de la section de contrôle	28
4.3.1	Cas d'un écoulement dénoyé proche du seuil de dérivation	29
4.3.2	Cas d'un canal d'amenée limitant le débit dérivé	30
4.3.3	Cas d'un débit contrôlé par la vanne motrice et le canal d'amenée	31
4.4	Que faire si la section de contrôle n'est plus dans son état d'origine ?	32
5	Formules utilisées pour le calcul du débit	34
5.1	Calcul de la ligne d'eau sur une portion de bief	34
5.1.1	Définition des variables de l'écoulement à surface libre	34

5.1.2	Calcul de la hauteur critique (h_c)	35
5.1.3	Calcul du débit en régime uniforme (formule de Manning-Stricker)	35
5.1.4	Calcul d'une courbe de remous	37
5.2	Calcul du débit d'un déversoir	44
5.2.1	Définition	44
5.2.2	Comment différencier l'écoulement noyé de l'écoulement dénoyé ?	45
5.2.3	Formule du déversoir dénoyé	45
5.2.4	Formule du déversoir noyé	46
5.3	Calcul du débit d'un orifice ou d'une vanne de fond	46
5.3.1	Définitions	46
5.3.2	Formule des orifices et ajutages	46
5.3.3	Formule pour une vanne de fond	47
6	Cas d'étude	49
6.1	Moulin de Roussel sur la Couze Chambon à Neschers (Puy-de-Dôme)	49
6.1.1	Description du moulin	49
6.1.2	Estimations du débit présentes dans le dossier	50
6.1.3	Estimation du débit maximum dérivable par modélisation	51
6.1.4	Critique des différentes méthodes de calcul	54
6.2	Moulin de Pont de Giret sur le Ger à Aspet (Haute-Garonne)	55
6.2.1	Description du site	55
6.2.2	Calcul de la consistance légale à partir de l'état statistique	55
6.2.3	Estimation du débit présente dans le dossier	57
6.2.4	Critique des différents modes de calcul	57
6.3	Usine hydroélectrique de Bourguignon sur le Doubs à Bourguignon (Doubs)	58
6.3.1	Présentation du cas d'étude	58
6.3.2	Données historiques	60
6.3.3	Calculs du débit maximum dérivable versés au dossier	61
6.3.4	Évaluation du calcul dérivable à partir des données historiques	62
6.3.5	Jugement du Conseil d'État	62
6.4	Moulin de Sienne sur la Sienne à Percy (Manche)	63
6.4.1	Présentation du cas d'étude	63
6.4.2	Application de la méthodologie de calcul du débit dérivé par modélisation	69
6.4.3	Formule de calcul du déversoir de décharge	74
6.4.4	Conclusion	78
7	Conclusion	79
8	Bibliographie	80
9	Table des illustrations	82
9.1	Table des figures	82
9.2	Liste des tableaux	83
10	Annexes	85
10.1	Tables de conversions	85
10.2	Arrêt Ulrich du Conseil d'État du 28 juillet 1866	85
10.2.1	Notice du document	85
10.2.2	Texte de la décision du Conseil d'État	86
10.2.3	Conclusions du rapporteur public	88
10.3	La méthode de dichotomie appliquée au calcul du débit maximum dérivable	92
10.4	Valeurs de coefficients de Strickler	92
10.5	Équation différentielle de calcul d'une courbe de remous	97

1 Introduction

1.1 Pourquoi ce guide méthodologique ? A qui s'adresse-t-il ?

De nombreux moulins en fonctionnement ou sur lesquels un projet de petite hydroélectricité est envisagé, ont ces dernières années fait valoir leur droit fondé en titre. Cette tendance s'accélère avec les volontés locales de faire revivre le patrimoine des moulins et la place donnée à la petite hydroélectricité dans la politique de transition énergétique comme en témoigne la loi de transition énergétique du 17 août 2015 fixant les objectifs de production d'énergie renouvelable. Concernant les moulins, cette politique s'est traduite en avril 2016 par l'appel d'offre lancé par le Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer subventionnant la réhabilitation de 50 installations comprises entre 36 et 150 kW.

Pour faire valoir leur droit, les gestionnaires de moulin font effectuer des études hydrauliques en vue de faire reconnaître la consistance légale du moulin. Les études réalisées font régulièrement appel à des formules dont les hypothèses nécessaires à leur application ne sont pas vérifiées. Les résultats qui en découlent sont alors souvent inexacts. Une mauvaise évaluation du débit maximum dérivable avec une sous-évaluation ou surévaluation conséquente par rapport au droit d'eau initial a des conséquences non négligeables en termes de productible et d'impacts environnementaux.

Le présent guide a pour but de passer en revue les différentes méthodologies permettant l'évaluation du débit maximum dérivable d'un droit fondé en titre, et de détailler leurs conditions d'application. Ce document s'adresse donc aux bureaux d'études chargés d'évaluer la consistance légale des moulins fondés en titre le plus fidèlement possible au vu des informations disponibles, aux services de l'état chargés de veiller à la conformité des études, ainsi qu'aux tribunaux chargés de régler les litiges.

1.2 Qu'est-ce qu'un droit fondé en titre ?

Les droits fondés en titre sont des droits féodaux qui ont perduré malgré l'abolition de la féodalité pendant la Révolution française. Tout moulin doté d'un titre authentique ou dont l'existence avérée est antérieure à l'Édit des moulins de 1566 pour les cours d'eau domaniaux et à l'abolition du régime féodal du 4 août 1789 pour les cours d'eau non-domaniaux bénéficie d'un droit fondé en titre ([MEEDDM, 2010](#)).

Une fois prouvée l'existence légale du droit fondé en titre, il faut en établir la consistance légale.

1.3 Qu'est-ce que la consistance légale ?

La consistance légale est la puissance hydraulique brute que le moulin était autorisé à utiliser à l'origine de ses droits.

L'arrêté du 11 septembre 2015 fixant les prescriptions techniques générales applicables aux installations, ouvrages, épis et remblais soumis à autorisation ou à déclaration en application des articles L. 214-1 à L. 214-3 du code de l'environnement et relevant de la rubrique 3.1.1.0. de la nomenclature annexée à l'article R. 214-1 du code de l'environnement dans son article 3 donne une définition de la consistance légale :

Pour l'application du présent article aux ouvrages et installations fondés, la puissance autorisée, correspondant à la consistance légale, est établie en kW de la manière suivante :

- sur la base d'éléments : états statistiques, tout élément relatif à la capacité de production passée, au nombre de meules, données disponibles sur des installations comparables, etc. ;
- à défaut, par la formule $P \text{ (kW)} = Q_{\text{max}} \text{ (m}^3\text{/s)} \times H_{\text{max}} \text{ (m)} \times 9,81$ établie sur la base des caractéristiques de l'ouvrage avant toute modification récente connue de l'administration concernant le débit dérivé, la hauteur de chute, la cote légale, etc.

Dans la formule ci-dessus, Q_{max} représente le débit maximal dérivé dans les anciennes installations, déterminé à partir des caractéristiques de la section de contrôle hydraulique du débit (selon les configurations des sites : section la plus limitante du canal d'aménée ou section de contrôle des anciens organes). H_{max} représente la hauteur maximale de chute de l'installation comptée entre la cote normale de fonctionnement de la prise d'eau et celle de la restitution à la rivière pour un débit total du cours d'eau égal à la somme du débit maximal d'équipement et du débit réservé à l'aval.

La consistance légale comprend donc deux éléments distincts : le débit maximum dérivable et la hauteur maximale de chute de l'installation. Elle se calcule selon la formule :

$$P = Q_{\text{max}} \times h_{\text{max}} \times 9,81 \quad (1.1)$$

Avec :

- P La consistance légale ou Puissance Maximale Brute (PMB) en kW ;
- Q_{max} Le débit maximum dérivable en $\text{m}^3\text{/s}$;
- h_{max} La hauteur de chute brute en mètres ;
- 9,81 L'accélération de la pesanteur terrestre g qui vaut $9,81 \text{ m/s}^2$.

La définition de la consistance légale est basée sur l'article L511-5 du code de l'énergie qui définit la puissance maximale brute (PMB) d'une installation. Elle est calculée à partir de la hauteur de chute maximum et du débit maximal dérivable lorsque le moulin tourne à plein régime.

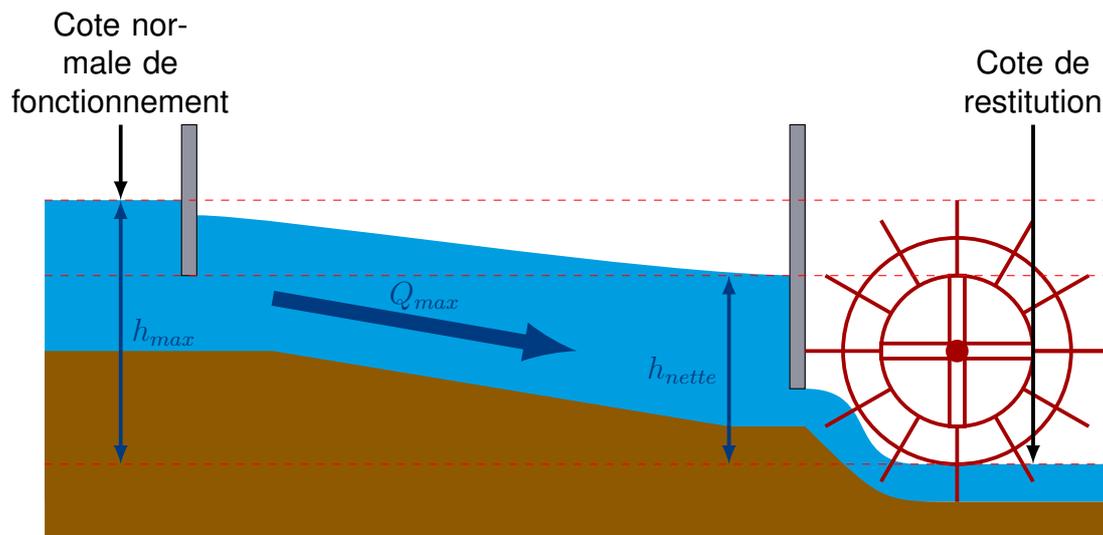


FIGURE 1.1 – Illustration de la hauteur maximale et de la hauteur nette

1.4 Comment différencier la puissance maximale brute de la puissance nette ?

La puissance nette de l'installation correspond à l'énergie qui sera effectivement produite par l'installation, on la calcule à l'aide de la formule suivante :

$$P_{nette} = Q_{dérivé} \times h_{nette} \times 9,81 \times R_{total} \quad (1.2)$$

Avec :

- P_{nette} la puissance nette en kW prenant en compte les pertes dues au rendement hydraulique et aux frottements des mécanismes du moulin ;
- $Q_{dérivé}$ le débit dérivé en m^3/s ;
- h_{nette} la hauteur de chute exploitée en mètres ;
- R_{total} Le rendement total de l'installation (compris entre 0 et 1) prenant en compte les pertes dues à la transmission de la force de l'eau sur la roue et les pertes dues aux frottements des axes, engrenages, courroies composant les mécanismes du moulin.

Elle comporte plusieurs différences par rapport à l'équation 1.1 de la consistance légale. Les différentes variables qui composent cette équation sont autant de paramètres que l'exploitant du moulin aura intérêt à optimiser afin de réduire l'écart entre la puissance nette produite et son droit à produire qu'est la consistance légale ou puissance maximale brute.

Le rendement total R_{total} constitue le point clé sur lequel va pouvoir jouer l'exploitant du moulin pour augmenter la puissance produite. Le paragraphe 2.2.3 page 15 évoque les valeurs de rendements connus pour différents types de roues. Ce rendement va de 0,15 pour les roues les plus archaïques à plus de 0,8 pour les roues et turbines modernes.

La hauteur nette h_{nette} est la hauteur de chute qui servira à la production d'énergie. Compte tenu des pertes de charge, plus la dérivation sera longue et plus la hauteur nette diminuera. La Figure 1.1 illustre la différence entre la hauteur max h_{max} et la hauteur nette h_{nette} sur une installation avec un canal d'amenée. Une fois la consistance légale établie, l'exploitant pourra augmenter la hauteur nette en réduisant les frottements dans le canal d'amenée par exemple en maçonnant le fond ou les parois du canal.

Le débit dérivé $Q_{dérivé}$ est limité par le droit d'eau Q_{max} défini dans la consistance légale. Avant le XIX^e siècle, les rendements des roues des moulins étant très faibles, on peut estimer que les exploitants des moulins utilisaient la totalité de leurs droits d'eau pour produire l'énergie nécessaire à leurs besoins. Sauf cas justifié par le fait que la mesure de débit aurait été faite alors que le moulin ne tournait pas à plein régime, on a $Q_{dérivé} = Q_{max}$.

1.5 Ambiguïtés autour de la définition de la consistance légale et jurisprudence

1.5.1 L'arrêt Ulrich

Dans beaucoup de dossiers actuels sur la reconnaissance de la consistance légale, il est fait référence à l'arrêt Ulrich du Conseil d'État du 28 juillet 1866. Cet arrêt établit clairement la différence entre la « force motrice brute qui résulte du volume, de la hauteur et de la pente de la chute d'eau, et la force utile qui tient à l'état du mécanisme extérieur : roues, coursiers, etc. La force utile peut augmenter par un perfectionnement du mécanisme extérieur sans que la force brute ait été modifiée ». Le texte complet de l'arrêt et des conclusions du rapporteur se trouvent en Annexe 10.2 page 85.

Le contexte exact de cet arrêt est le suivant : des travaux pour la navigation réalisés par l'État sur la rivière Zorn ont diminué la capacité productive du moulin de M. Ulrich. Une compensation financière a été versée à M. Ulrich calculée sur la puissance nette connue par l'État de l'usine de M. Ulrich. Cependant, par rapport à la situation connue par l'administration, M. Ulrich avait effectué des modifications sur son installation ce qui fait que « la force motrice actuelle de l'usine est supérieure à celle dont l'usinier jouissait en 1790. Ce n'est pas que le volume ni la hauteur de la chute d'eau aient été augmentés. Mais la position et la largeur des roues ont été modifiées. La vanne motrice est inclinée au lieu d'être verticale ; il s'en suit que les roues rendent 27 p. 100 au lieu de 15 p. 100. Les changements apportés à la situation des roues et de la vanne motrice ayant été opérés sans autorisation de l'administration, le conseil de préfecture a décidé qu'il ne devait pas être tenu compte du supplément de force motrice qui résultait de ces changements irréguliers. ».

Le Conseil d'État a reconnu que M. Ulrich n'avait pas besoin de demander une autorisation pour effectuer ces modifications qui, en augmentant le rendement, ont augmenté la puissance nette produite sans pour autant modifier la consistance légale de l'installation et qu'il était autorisé à réclamer une compensation sur la base de la puissance nette produite par ses nouveaux équipements. On trouve quelques jugements identiques dans la jurisprudence¹.

1.5.2 Confusion entre puissance nette et débit maximum dérivable

L'arrêt Ulrich a été notamment invoqué dans le jugement n°393293 du Conseil d'État du 16 décembre 2016 dont une analyse approfondie figure au Paragraphe 6.3 parmi les cas d'étude proposée dans cette méthodologie.

Dans ce jugement et dans quelques autres décisions², il est fait une interprétation erronée de l'arrêt Ulrich. L'arrêt Ulrich se borne à reconnaître que l'exploitant d'un moulin peut modi-

1. Conseil d'État : 6/12/1866, Ramspacher ; 9/5/1867, Hummel ; 18/8/1869, Colle ; 20/5/1881, Chalot

2. par exemple : CAA de Lyon n°13LY01945 du 21/10/2014 décrit dans la Section 2.4.2

fier son installation pour maximiser son rendement mécanique sans modifier le débit dérivé maximal ni la hauteur de chute brute.

Dans leur état actuel, beaucoup de moulins ne possèdent plus les organes de régulation du débit dérivé qui se trouvent être la plupart du temps les vannes motrice placées immédiatement à l'amont de la ou des roues. Malgré cet état de fait, la jurisprudence considère que l'installation est demeurée inchangée depuis l'établissement du droit fondé en titre et que le calcul du débit dérivé peut se faire en l'absence de ces organes de régulation qu'elle considère comme faisant partie des mécanismes pouvant être optimisés par l'exploitant du moulin.

Raisonnement ainsi est une erreur compte tenu du fait que ce sont précisément ces ouvrages de régulation qui déterminent le débit Q_{max} qui était dérivé à l'époque de l'établissement du droit fondé en titre. Ces mêmes ouvrages ont été dimensionnés conformément à la consistance légale initiale.

Faire abstraction de ces ouvrages dans le cas du calcul du débit dérivable à partir de la description actuelle d'un moulin conduit à calculer et reconnaître un débit dérivé supérieur qui peut être sans commune mesure avec le débit Q_{max} qui était effectivement dérivé par le moulin en exploitation lors de l'établissement du droit fondé en titre.

La Section 4.4 page 32 explique l'importance de la prise en compte de la vanne motrice de la roue dans le calcul du débit maximum.

1.5.3 Cas de plusieurs moulins sur une seule dérivation

La formule de la consistance légale telle que définie dans la Section 1.3 est difficilement applicable quand plusieurs moulins en parallèle ou en série sont situés sur un même bief de dérivation. La définition issue de l'article L511-5 du code de l'énergie considère la puissance brute exploitable globalement sur une dérivation mais ne propose pas de solution pour déterminer la consistance légale de plusieurs moulins sur cette dérivation. L'arrêt Terrien du Conseil d'État le 22 décembre 1950 rapporte un cas de ce type où le propriétaire de deux moulins en série sur un seul bief avait court-circuité le moulin amont en établissant une conduite forcée jusqu'au moulin aval. La transformation profonde de l'installation bien que ne modifiant pas la consistance légale, telle qu'elle est définie l'article L511-5, a été considérée comme sortant du cadre d'une installation fondée en titre.

Il faut donc bien considérer le droit fondé en titre de chaque moulin et répartir le débit dérivé entre les moulins dans le cas de moulins en parallèles et répartir la hauteur de chute maximum dans le cas de moulins en série (Voir le cas d'étude du Moulin Giret, Section 6.2 page 55).

1.6 Comment définir le débit maximum dérivable ?

L'arrêté du 11 septembre 2015 énonce deux familles de méthodes. L'une est basée sur les données historiques tandis que l'autre se base sur l'état actuel des installations pour estimer le débit maximum dérivable. De ces deux familles, on peut tirer trois méthodes de détermination du débit maximum dérivable :

1. l'utilisation des données historiques dont la principale difficulté consistera à établir que ces données permettent d'évaluer la puissance brute de l'installation et non pas la puissance nette ;

2. l'utilisation de la configuration actuelle des lieux avec des mesures de débits des ouvrages en fonctionnement à débit maximal ;
3. l'utilisation des données actuelles en effectuant une modélisation à partir de données passées ou présentes de topographie et de géométrie des organes constituant l'installation.

On essaiera au maximum de croiser les résultats de ces différentes méthodes afin de vérifier leurs cohérences et essayer d'établir une consistance légale la plus vraisemblable possible. Il conviendra notamment de s'assurer que le débit maximal obtenu par modélisation hydraulique à partir de la topographie actuelle n'est pas complètement déconnecté des mesures in situ ou du calcul du débit maximal obtenu à partir des données historiques.

2 Évaluation du débit maximal dérivable à partir des données historiques

2.1 Principe de la méthode

L'article 3 de l'arrêté Ministériel du 11 septembre 2015 propose d'utiliser les « états statistiques, tout élément relatif à la capacité de production passée, au nombre de meules, données disponibles sur des installations comparables, etc. ».

Or, la consistance légale telle que définie dans la Section 1.3 correspond à la puissance maximale brute de l'installation. Plusieurs cas sont alors possible en fonction de la nature des données historiques connues :

- si on a le débit dérivé et les cotes du seuil et de la restitution, on peut directement appliquer l'Équation 1.1 page 9 ;
- si on a le débit dérivé, on peut l'utiliser et calculer la consistance légale à partir des cotes du seuil et de la restitution actuelles (à condition que ces dernières n'aient pas subies de modifications) ;
- si on a la puissance nette développée sans indication de débit, on reconstitue le débit dérivé à partir de la méthode développée dans la Section 2.3 ci-dessous.

2.2 Définition de la puissance nette

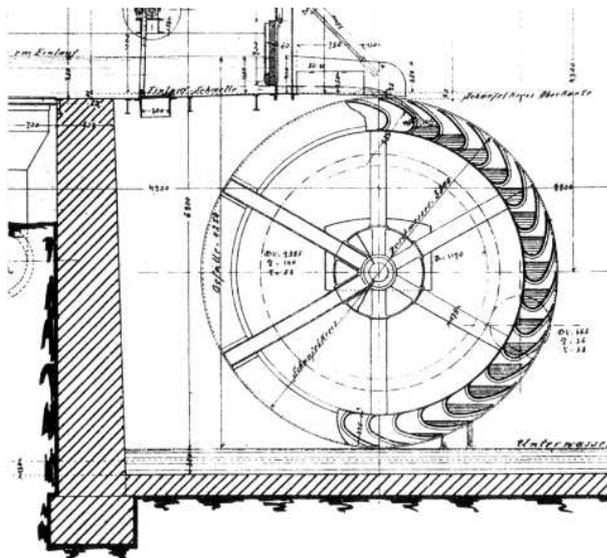
2.2.1 Formule de la puissance nette

La formule a déjà été présentée dans la Section 1.4 page 10 :

$$P_{nette} = Q_{dérivé} \times h_{nette} \times 9.81 \times R_{total} \quad (2.1)$$

Avec :

- P_{nette} la puissance nette en kW prenant en compte les pertes dues au rendement hydraulique et aux frottements des mécanismes du moulin ;
- $Q_{dérivé}$ le débit dérivé en m³/s ;
- h_{nette} la hauteur de chute exploitée en mètres ;
- R_{total} Le rendement total de l'installation (compris entre 0 et 100%) prenant en compte les pertes dues à la transmission de la force de l'eau sur la roue et les pertes dues aux frottements des axes, engrenages, courroies composant les mécanismes du moulin.



(a) Schéma de la roue au dessus (Extrait de MÜLLER et KAUPPERT, 2004)



(b) Photo de la roue du Moulin Dussard (Belgique) (Crédit : Daniel Dussard, licence CC BY-SA 2.0 BE)

FIGURE 2.1 – Schéma et photo d'une roue au dessus

2.2.2 Hauteur de chute nette

La hauteur de chute h_{nette} sera au maximum égale à la hauteur retenue entre la cote normale de fonctionnement et la cote de restitution au cours d'eau. Dans les faits, il faudra prendre en compte une hauteur de chute inférieure à déterminer en fonction de la topologie du site et de la connaissance du type de moulin du site (Voir l'illustration de la hauteur maximale et de la hauteur nette Figure 1.1 p. 10).

2.2.3 Rendement total du moulin

Le rendement R_{total} est sujet à de grandes variations en fonction du type de roue.

Les roues à augets fonctionnant par surverse dite « roue au dessus » (Voir Figure 2.1) donnent des rendements très élevés pouvant dépasser 85 % (MÜLLER et KAUPPERT, 2004).

Pour les roues en dessous (Figure 2.2a), le guide du meunier et du constructeur de moulin (EVANS, 1830 p. 148) relate des expériences réalisées pour lesquelles le rendement total se situe aux alentours de 30 %. D'autres sources indiquent un rendement maximal de 25 % sur les roues en dessous à aubes planes (DELAUNAY, 1852 p. 542) ou encore de 30 à 40% pour ce même type de roue (VIOLLET, 2005).

Les roues de côté (Figure 2.2b), appelées aussi roues de poitrine ou roues alimentées à l'épaule, ont un rendement plus important avec un rendement moyen de 65 % pour des roues de côté à aubes planes (DELAUNAY, 1852) et des rendements dépassant 80 % pour les roues de type Poncelet, Sagebien ou Zuppinger réalisées dans la deuxième partie du XIX^{ème} siècle (VIOLLET, 2005).

Les roues à axe vertical appelées roues à cuillère ou encore moulin à rodet, bien qu'elles aient l'avantage d'actionner directement la meule sans engrenage ou courroie intermédiaire, offrent un rendement maximal de 33 % pour les rodets traditionnels qu'on trouve dans le Sud-Est de la France ou dans le Finistère (DELAUNAY, 1852 p. 550, ARMENGAUD, 1858

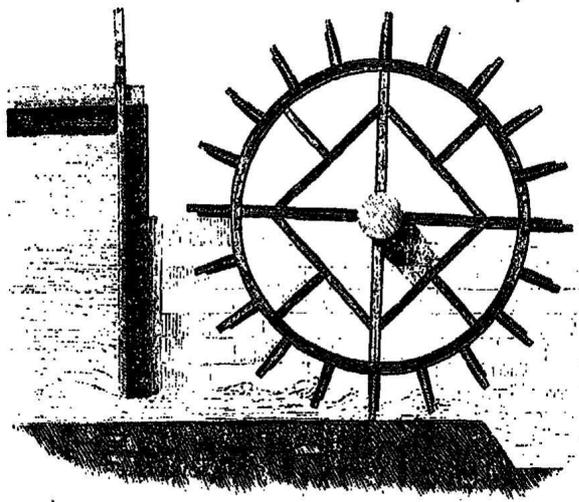


Fig. 436.

(a) Schéma d'une roue en dessous à aubes planes

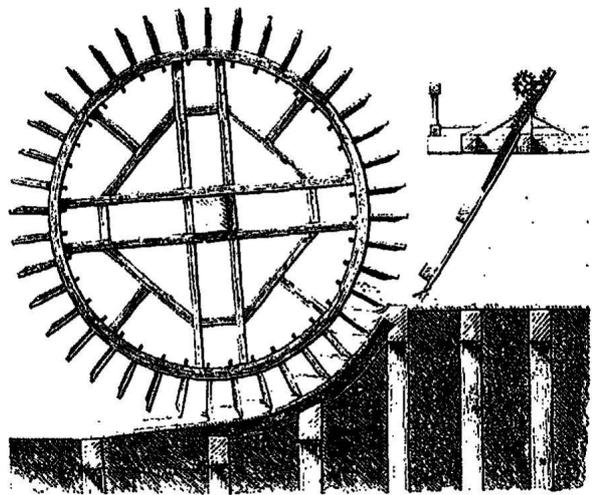


Fig. 441.

(b) Schéma d'une roue de côté

FIGURE 2.2 – Schémas de roues en dessous et de côté (Extrait de DELAUNAY, 1852)

p. 255). D'après VIOLLET, 2005, ce rendement atteint 35 % avec les roues à cuve utilisées sur les moulins du Bazacle à Toulouse (Figure 2.4).



FIGURE 2.3 – Photo du rodet du moulin de Nougayrol à Castanet-le-Haut (Hérault) (Crédit : Castanet, licence : CC BY-SA 3.0)

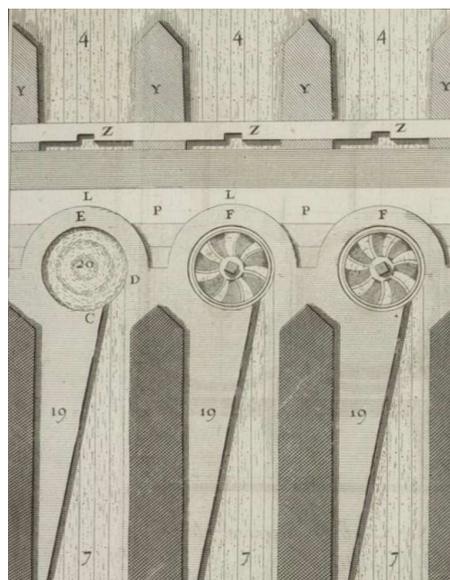


FIGURE 2.4 – Plan des moulins du Bazacle à Toulouse (Haute-Garonne) (Extrait de BELIDOR, 1737)

2.3 Calcul du débit dérivé à partir de la puissance nette

A partir de l'équation 2.1, on peut calculer le débit dérivé compte tenu de la puissance nette mesurée avec la formule :

$$Q_{derive} = \frac{P_{nette}}{h_{nette} \times 9.81 \times R_{total}} \quad (2.2)$$

Pour obtenir le débit maximum dérivable, il faut prendre en compte les incertitudes existantes sur la hauteur de chute nette h_{nette} et le rendement de l'installation R_{total} . Les deux termes étant au dénominateur, on retiendra leurs valeurs minimales compte tenu de leurs incertitudes.

Concernant le rendement, en l'absence de la connaissance du type de roue utilisée, un rendement de 20 % est une valeur minimale vraisemblable si on considère une roue en dessous à aubes planes qui est celle qui offre le rendement le plus médiocre.

Concernant la hauteur de chute, la question ne peut être traitée qu'au cas par cas. On pourra par exemple prendre en compte les contraintes liées au niveau d'eau aval en hautes eaux qui empêchent le moulin de fonctionner.

2.4 Position de la jurisprudence concernant les données historiques

2.4.1 Cas des décisions administratives passées

Dans la jurisprudence, les puissances et débits issus de données historiques ne sont systématiquement acceptés que si ces données relèvent de décisions administratives :

- soit la donnée relève d'une décision reconnaissant le droit fondé en titre et définissant la consistance légale comme dans le cas Société Hydro SIA, CE 1^{er} février 2012, n°324580 où la consistance légale avait été définie par un arrêté préfectoral de 1961 qui est reconnu comme étant définitif ;
- soit c'est une donnée historique ayant été reconnue comme définissant la consistance légale par une décision administrative passée. On trouve ce cas dans le jugement n°122588 du Conseil d'État du 7 décembre 1998 (SARL Centrale Mazarin) où il est pris en compte une expertise contradictoire datant de 1858 fixant la consistance légale du moulin car un décret de 1897 d'autorisation de reconstruction du moulin comporte une concession d'un supplément de force motrice et reconnaît donc implicitement la consistance légale définie en 1858.

Cette dernière décision du Conseil d'État peut aussi signifier qu'en dehors d'une décision administrative reconnaissant implicitement ou explicitement une consistance légale, le résultat d'une expertise contradictoire permet de définir cette dernière dans la mesure où elle est acceptée par toutes les parties.

2.4.2 Cas des états statistiques et des capacités de production

Concernant les données du type de celles énoncées à l'article 3 de l'arrêté Ministériel du 11 septembre 2015 telles que « états statistiques, tout élément relatif à la capacité de production passée, au nombre de meules, données disponibles sur des installations comparables, etc. », la jurisprudence est moins constante.

Dans l'arrêt Vincienne du 26 décembre 1917, le Conseil d'État juge que la consistance légale doit être calculée sur la base de « la force motrice nécessaire aux deux moulins et au foulon existant en 1763 et en 1791 » alors que le requérant demandait à ce que ce soit « uniquement dans le présent que » soit « examinée la consistance légale du moulin » et « que la consistance légale du moulin consiste dans la force utilisable du cours d'eau ». Ici, la jurisprudence privilégie explicitement les données issues des documents historiques pour évaluer la consistance légale plutôt que les études basées sur les éléments existants en 1917.

A contrario, la cour administrative d'appel de Lyon, dans son jugement n°13LY01945 du 21 octobre 2014 rejette l'utilisation d'un débit dérivé présent dans des états statistiques réalisés en 1899 pour fixer le débit maximum dérivable car ils estiment que cela « ne concernent que la capacité productive du moulin alors en activité ». Or comme évoqué dans les Sections 1.4 et 1.5.2, on comprend que le juge, se basant sur l'arrêt Ulrich (voir Section 1.5.1) a cherché à différencier la puissance maximale brute et la puissance nette fournie par les états statistiques. Par contre, c'est une erreur de croire que le débit mesuré dans l'état statistique ne reflète pas le débit maximum dérivable.

La circulaire du 4 juillet 1878 qui régit la mise en œuvre de l'inventaire statistique des cours d'eau non navigables, ni flottables ([MINISTÈRE DES TRAVAUX PUBLICS, 1905](#)) définit les conditions de mesure du débit dérivé. Ces conditions sont les mêmes que celles recherchées pour la mesure de la consistance légale, à savoir : « le volume débité par le coursier ou la vanne motrice, quand le bief amont est réglé au niveau légal de la retenue ». De plus, étant donné que les états statistiques cherchent à évaluer la capacité productive totale des équipements du territoire, et qu'avec des rendements faibles, la puissance nécessaire à la production était obtenue grâce à une importante dépense en débit, il y a tout lieu de considérer que le débit mesuré dans les états statistiques est le débit maximum autorisé par le droit fondé en titre.

Les éléments historiques doivent donc être pris en compte dans l'évaluation de la consistance du droit accordé initialement au moulin à condition de bien discerner les liens existants entre le débit dérivé, la hauteur exploitée, le rendement, la puissance nette, la hauteur de chute maximale et la puissance maximale brute.

3 Évaluation du débit maximal dérivable à partir de mesures de débit

3.1 Quand appliquer cette méthode ?

Le jugement n°393293 du Conseil d'Etat du 16 décembre 2016 précise l'applicabilité de la méthode :

Le juge administratif peut tenir compte notamment des mesures de débit réelles effectuées sur le site par l'administration, à la condition toutefois que celle-ci démontre que ces mesures sont pertinentes pour apprécier la puissance maximale théorique.

Pour appliquer cette méthode, plusieurs critères sont nécessaires :

- l'installation est en état de fonctionner de manière optimale et dans les mêmes conditions que celles applicables au moment de l'établissement du droit fondé en titre ;
- il n'est pas démontré ou démontrable que l'installation actuelle ait modifié la consistance légale ;
- le débit mesuré passe en totalité dans l'installation (absence de surverse ou de vanne de décharge en fonctionnement).

Il est alors possible en accord avec l'exploitant du moulin d'effectuer une mesure du débit dérivé lorsque les conditions hydrologiques permettent d'atteindre la cote légale de fonctionnement afin d'évaluer le débit maximal dérivable de l'installation.

Comme nous le verrons au chapitre 4, le contrôle hydraulique déterminant le débit maximal est souvent localisé au niveau de l'usine. Le débit maximal actuel est donc dépendant des ouvrages de régulation du moulin qui sont rarement dans leur état d'origine. Dans les faits, l'utilisation d'une mesure de débit pour déterminer le débit maximal dérivable ne sera rigoureusement possible que si le contrôle hydraulique se situe au niveau du canal d'amenée ou de la prise d'eau du canal d'amenée et que leur géométrie (dimensions et rugosité) n'a pas été modifiée.

3.2 Quelles techniques de mesure employer ?

Dans le cas d'une usine hydroélectrique, si le pétitionnaire est d'accord et à condition de se trouver dans les conditions hydrauliques évoquées dans la Section 3.1, il est tout à fait possible d'utiliser les données d'exploitation de l'usine afin d'en tirer le débit maximum entonné par les turbines.

Dans le cas où les données d'exploitation sont inaccessibles, on effectuera une mesure de débit en utilisant une des techniques proposées dans l'ouvrage « Contrôle des débits réglementaires. Application de l'article L.214-18 du code de l'environnement » (LE COZ et al., 2011).

3.3 Utiliser la mesure de débit pour la modélisation

Si on ne peut reproduire les conditions évoquées dans la Section 3.1, il est tout de même possible de mesurer le débit et les cotes de l'eau dans le canal d'amenée. Ces mesures permettront de déterminer des paramètres hydrauliques tels que la rugosité du canal (Voir formule de Manning Strickler Section 5.1.3.1 page 36) ou le coefficient de débit d'un ouvrage (Voir les formules de déversoirs, Section 5.2 et d'orifices et vannes, Section 5.3). Ces paramètres calés sont ensuite utilisés dans le cadre d'une évaluation du débit maximal dérivable par modélisation.

4 Évaluation du débit maximal dérivable par modélisation

Les études hydrauliques réalisées pour le calcul de la consistance légale se bornent souvent à calculer la surface de la section d'écoulement la plus étroite et à y appliquer une vitesse moyenne d'écoulement qui vaut entre 0,5 m/s et 1 m/s en fonction de la région. Il faut rappeler ici que cette méthode n'a aucun fondement hydraulique et que la vitesse de l'écoulement est un résultat du calcul du débit par modélisation et non pas une donnée d'entrée du calcul.

Ce chapitre présente donc les règles de l'art pour le calcul du débit maximal dérivable par modélisation en définissant tout d'abord la notion de « section de contrôle hydraulique du débit » citée dans l'arrêté du 11 septembre 2015 (voir Section 1.3) ainsi que la localisation de cette section. Pour chaque localisation, une méthode de calcul adaptée est ensuite proposée. Les formules utilisées dans les différentes étapes du calcul et leurs conditions d'utilisation sont présentées au chapitre 5.

4.1 Définition de la section de contrôle hydraulique

4.1.1 Les localisations possibles de la section de contrôle

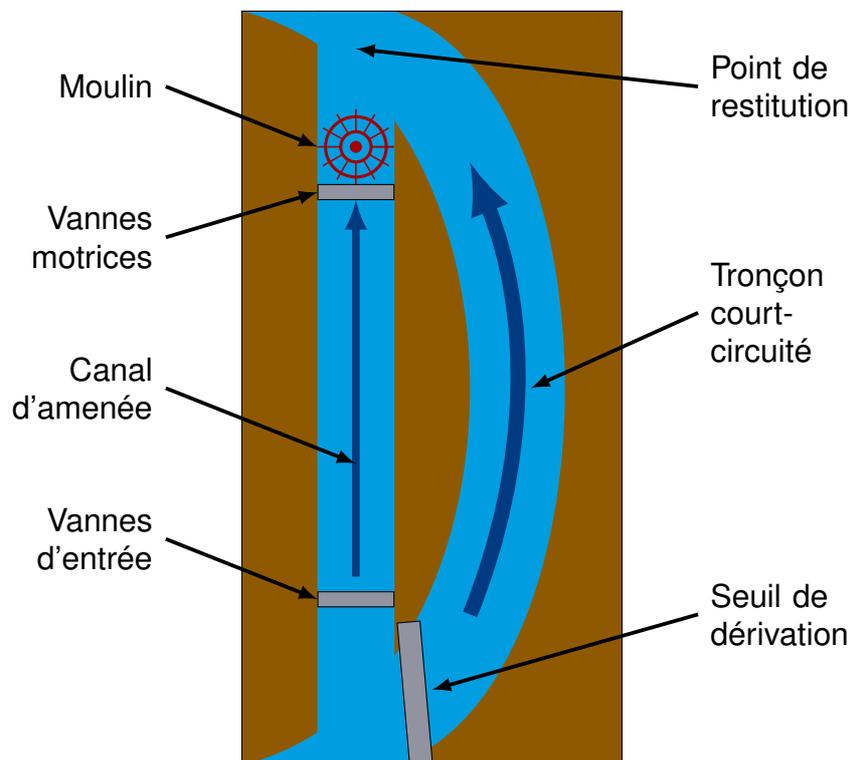


FIGURE 4.1 – Plan de la topographie possible d'un moulin

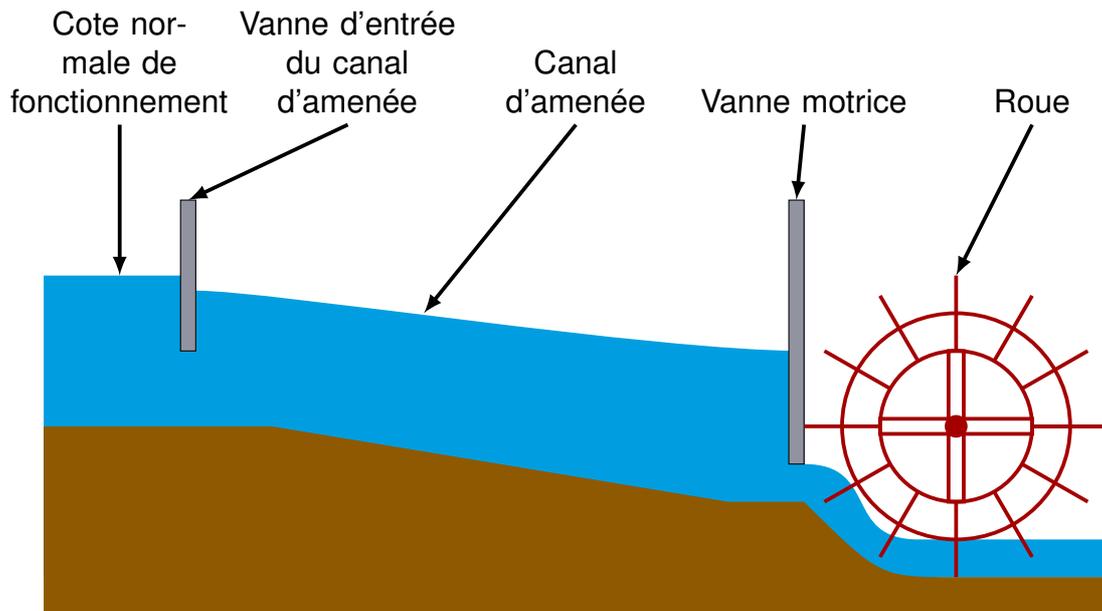


FIGURE 4.2 – Profil en long de la topographie possible d'un moulin

On peut définir la topographie d'un moulin comme suit (Figures 4.1 et 4.2) :

- L'eau de la rivière est détournée au moyen d'un seuil. La plupart du temps, la cote de ce seuil est la cote retenue comme cote normale de fonctionnement de la prise d'eau.
- Ensuite, soit le moulin est directement disposé au droit du seuil, soit un canal d'amenée achemine l'eau jusqu'au moulin. Ce canal peut faire plusieurs kilomètres et est éventuellement pourvu de vannes d'entrée.
- Les vannes motrices situées à l'amont des roues régulent le débit utilisé par le moulin.
- Enfin, si le moulin ne débouche pas directement sur le cours d'eau dérivé, l'aval du moulin est pourvu d'un canal de restitution.

En fonction de la configuration des lieux, la section d'écoulement limitant le débit se situe :

- au niveau des organes de contrôle du débit à l'amont de la roue ;
- au niveau du canal d'amenée ;
- au niveau des vannes d'entrée du canal d'amenée.

Dans le cas où il y a un canal d'amenée, la détermination de la localisation de cette section n'est pas aisée et nécessite de comprendre les phénomènes hydrauliques en jeu. Dans le cas où le moulin se situe au droit du seuil, la section de contrôle se situe au niveau des organes situés à l'amont de la roue (Voir Paragraphe 4.3.1).

4.1.2 Les régimes d'écoulement en hydraulique à surface libre

En hydraulique à surface libre, l'écoulement de l'eau est régi par différents phénomènes qu'il est important de comprendre pour définir la section de contrôle. La Figure 4.3 représente les différents types d'écoulement que l'on pourra rencontrer sur un bief de rivière ou de canal :

- ① Lorsque la pente de la ligne d'eau est faible, l'écoulement se caractérise par une vitesse faible. Compte tenu du débit qui transite, la profondeur est importante. Ce régime d'écoulement se nomme le *régime fluvial*. Les obstacles situés à l'aval ont une influence sur la ligne d'eau et sur le débit. La ligne d'eau dans cette zone d'influence

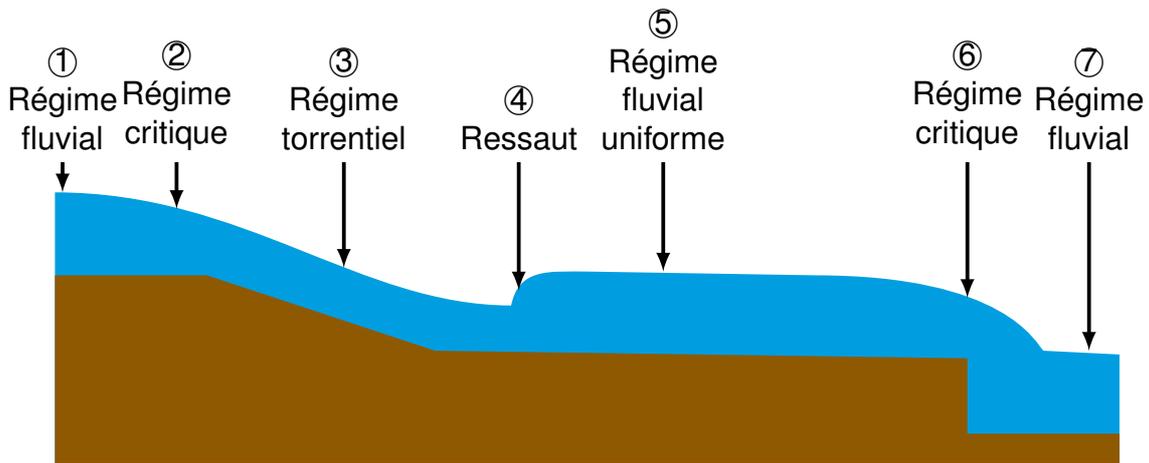


FIGURE 4.3 – Schéma théorique représentant les différents régimes hydrauliques en écoulement à surface libre

où la hauteur d'eau varie graduellement en fonction de l'abscisse s'appelle une *courbe de remous*. Le calcul d'une courbe de remous s'effectue de proche en proche à partir de calculs successifs des hauteurs d'eau tout le long du bief. En régime fluvial, le calcul se fera de l'aval vers l'amont à partir d'une hauteur d'eau imposée à l'aval.

- ② A l'amont d'une pente forte, la hauteur d'eau se réduit et passe par un niveau dit *hauteur critique* caractérisant le *régime critique* qui est la limite du passage d'un régime fluvial vers un régime torrentiel (Voir point ③).
- ③ Sur une portion de bief avec une pente forte, la hauteur d'eau va se réduire et l'écoulement va s'accélérer au point que les obstacles situés à l'aval n'auront pas d'influence sur la ligne d'eau et sur le débit. Cette situation caractérise le *régime torrentiel*. En régime torrentiel, le calcul de la courbe de remous se fait de l'amont vers l'aval à partir d'une hauteur d'eau imposée à l'amont.
- ④ A la fin de la zone pentue, l'eau cherche de nouveau à s'écouler en régime fluvial. La partie fluviale à l'aval oppose un front à l'écoulement torrentiel venant de l'amont. Cela se traduit par une zone de turbulences appelée *ressaut hydraulique*.
- ⑤ Cette zone en régime fluvial est assez longue et se caractérise par le fait qu'à partir d'un certain point la ligne d'eau est parallèle au fond. Cette situation traduit le fait que l'on se situe dans une zone suffisamment loin des perturbations venant de l'aval pour ne pas être influencé par celles-ci. La hauteur d'eau ne dépend que du débit, de la géométrie de la section, de la pente et de la rugosité. Cette hauteur d'eau s'appelle la hauteur normale et correspond à un écoulement en régime uniforme¹.
- ⑥ A l'approche d'une chute, la ligne d'eau s'affaisse (voir ①) jusqu'à atteindre la hauteur critique au niveau du seuil (voir ②).
- ⑦ Après la chute, l'écoulement s'effectue ici de nouveau en régime fluvial.

4.1.3 Comment se caractérise une section de contrôle ?

La section de contrôle se définit par le fait qu'elle n'est pas sujette à une influence venant d'un obstacle à l'aval. On rencontre cette situation dans deux cas :

1. On peut avoir un écoulement en régime uniforme aussi bien en fluvial qu'en torrentiel.

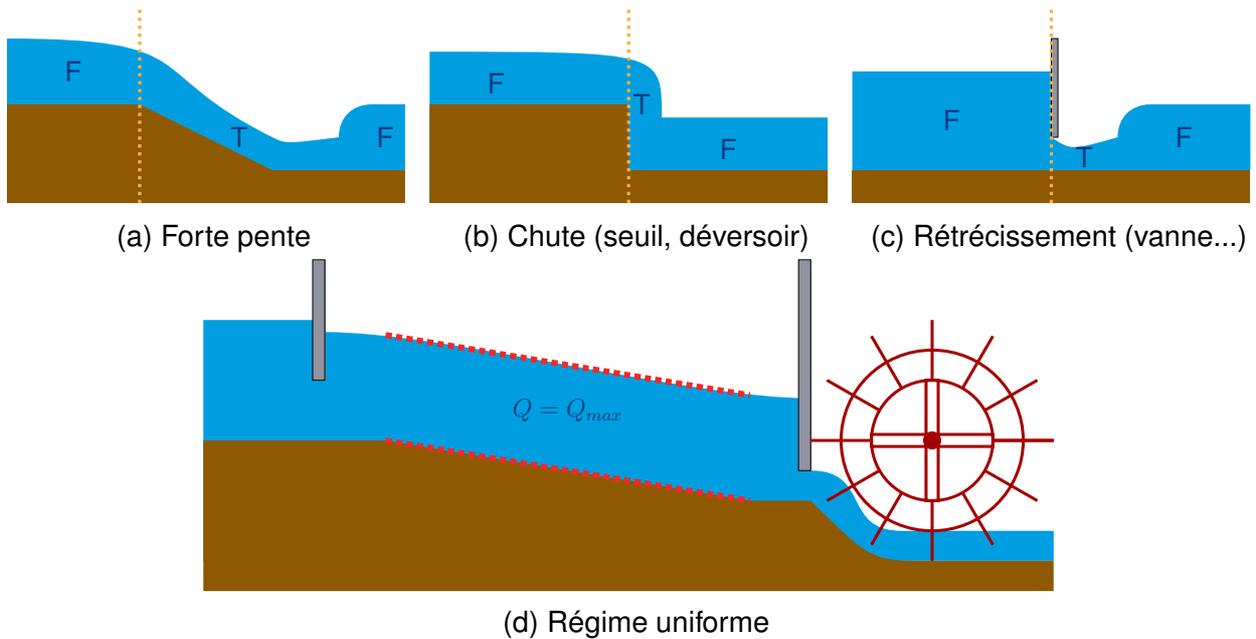


FIGURE 4.4 – Schémas des différents types de section de contrôle

- La section se situe à l'amont d'un passage en régime torrentiel (Voir la section en orange pointillée et les régimes fluvial (F) et torrentiel (T) représentés sur les Figures 4.4) qui se traduira par :
 - une chute générée par un seuil ou déversoir (Voir Figure 4.4b et cas ⑥ du paragraphe 4.1.2),
 - une forte pente (Voir Figure 4.4a et cas ② du paragraphe 4.1.2),
 - un rétrécissement latéral (fente, échancrure) ou vertical (vanne) où le niveau d'eau à l'aval est suffisamment bas pour que le régime torrentiel soit présent à l'aval de la vanne (Voir Figure 4.4c). Pour les seuils ou les vannes présentant cette caractéristique, on parle alors d'*écoulement dénoyé*.
- La section est située suffisamment loin des perturbations aval. Sur cette portion, la section, la pente et la rugosité du bief sont constants et la ligne d'eau est parallèle au fond. Cette situation correspond régime uniforme décrit Figure 4.4d et au ⑤ du paragraphe 4.1.2.

Dans ces deux cas, le débit dans la section ne dépend pas du niveau d'eau aval. On peut calculer le débit d'une section de contrôle à partir de son niveau d'eau et de ses caractéristiques.

L'objectif d'un moulin étant d'exploiter une chute d'eau, on trouvera toujours logiquement une section de contrôle avec un écoulement dénoyé au niveau du moulin lui même. Cependant, cette section de contrôle n'est pas forcément unique, et il faut éventuellement la rechercher plus à l'amont.

4.2 Comment trouver la section de contrôle ?

4.2.1 Méthode de recherche de la section de contrôle

La méthode consiste simplement à parcourir de l'amont vers l'aval le chemin de l'eau dans le bief dérivé et de détecter où se trouve la première section de contrôle depuis l'amont. La

recherche de la section de contrôle doit se faire en considérant tous les organes mobiles de régulation utilisés pour le fonctionnement normal du moulin ouvert à leur maximum.

Le synoptique en Figure 4.5 résume les différentes questions à se poser pour déterminer la localisation de la section de contrôle.

4.2.2 Que faire si la section de contrôle n'est pas facilement identifiable ?

Comme évoqué à la fin du paragraphe 4.1.1 page 22, il n'est parfois pas trivial de déterminer l'emplacement de la section de contrôle. Le seul moyen de calculer le débit maximal dérivable consiste alors à effectuer le calcul décrit au paragraphe 4.3.3 qui correspond en fait à une modélisation complète de la ligne d'eau de la vanne motrice jusqu'au seuil de dérivation.

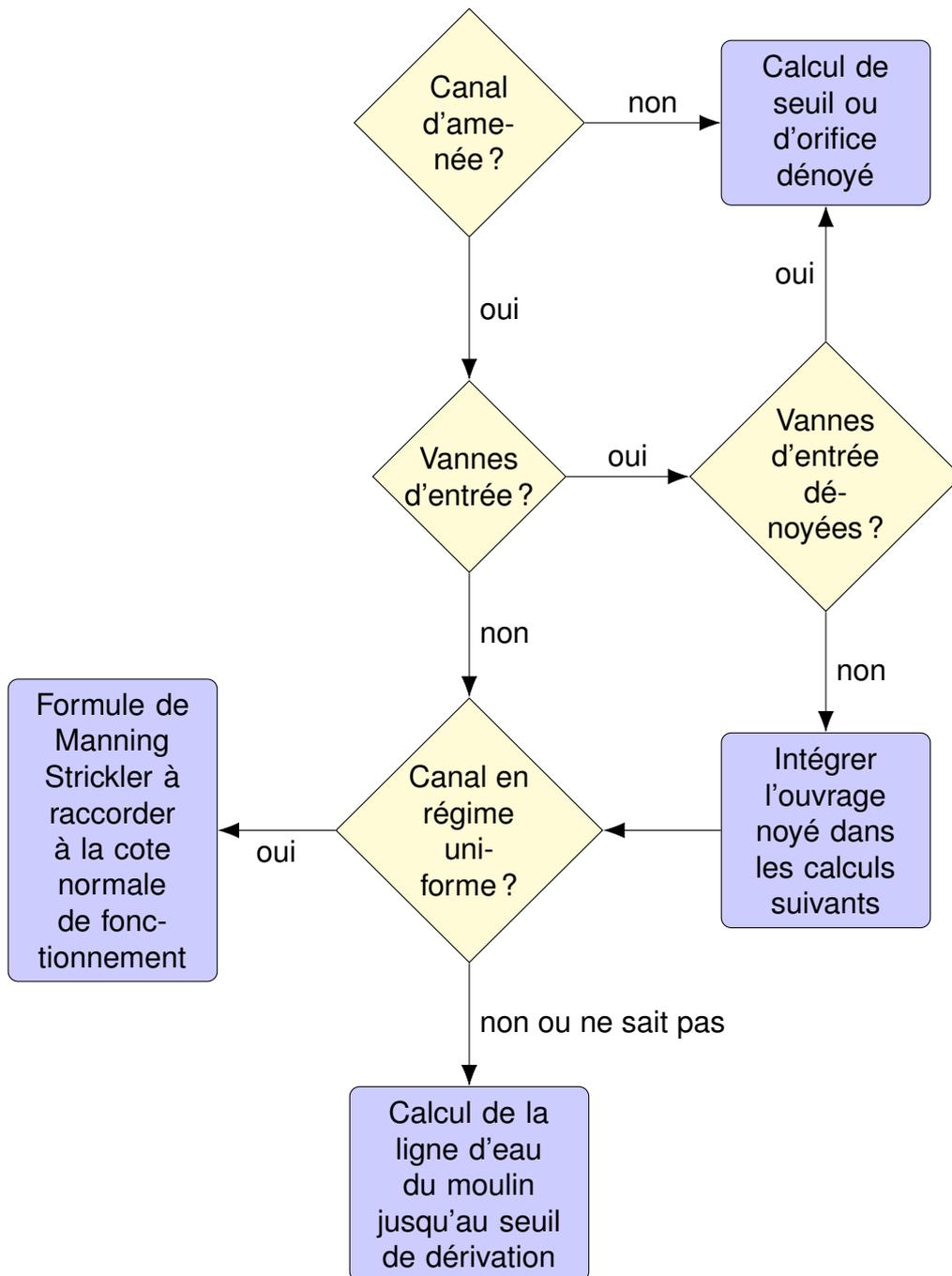


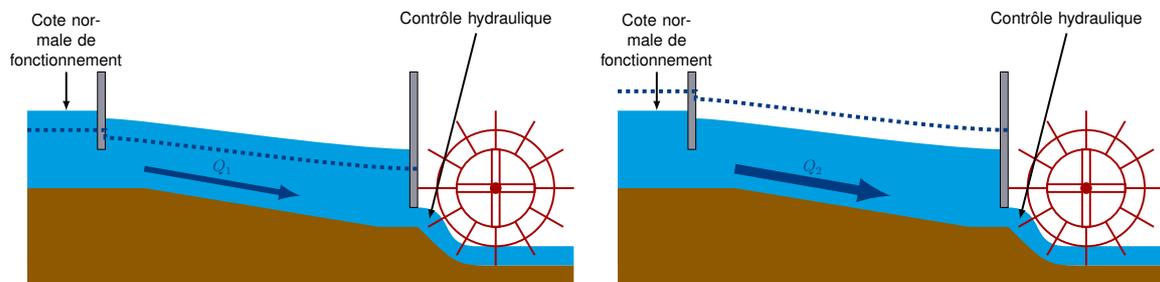
FIGURE 4.5 – Arbre de décision du calcul du débit maximum dérivable

4.3 Méthodes de calcul du débit maximum dérivable en fonction de la localisation de la section de contrôle

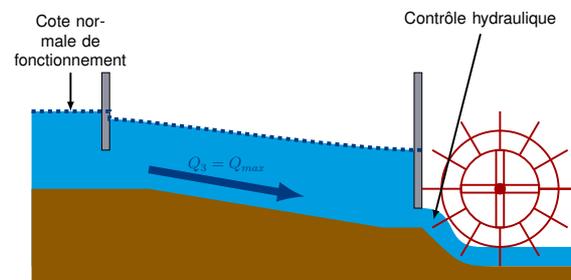
L'exemple de la figure 4.1 page 22 permet de décliner toute la diversité des situations observables sur le terrain. Il est éventuellement possible que des sites présentent des situations plus complexes encore, par exemple en enchaînant en série plusieurs biefs avec des ouvrages de régulation, mais la méthode de calcul restera la même.

Il en est de même pour les sites plus simple sans vanne de canal d'amenée ou sans canal d'amenée. Le cas du moulin sans canal d'amenée est traité au paragraphe 4.3.1.

La méthode générale va consister à modéliser l'installation et à calculer le débit permettant de retrouver une cote de l'eau à l'amont de l'installation qui correspond à la cote normale de fonctionnement. Ce calcul pourra être direct si le moulin se situe au droit du seuil de dérivation mais pour les cas identifiés aux paragraphes 4.3.2 et 4.3.3, il n'existe pas de méthode directe permettant de calculer le débit maximum dérivable. Il faut procéder par des essais successifs comme illustré à la Figure 4.6. Dans ce cas, il est conseillé de procéder par dichotomie. Cette méthode est expliquée en annexe 10.3.



(a) La ligne d'eau calculée est inférieure à la cote normale : le débit choisi est trop faible (b) La ligne d'eau calculée est supérieure à la cote normale : le débit choisi est trop élevé



(c) La ligne d'eau calculée est identique à la cote normale : le débit choisi est le débit maximum dérivable

FIGURE 4.6 – Calculs successifs du débit permettant de raccorder la ligne d'eau à la cote normale de fonctionnement

Les cas présentés ci-après supposent que l'on sache identifier et localiser la section de contrôle. Sur un site n'étant pas en eau ou avec un fonctionnement observé en dehors de la plage supposée du débit maximal dérivable, la localisation de la section de contrôle n'est pas forcément aisée. Pour répondre à cette question, une méthode de calcul générique qui correspond à une modélisation complète du site est proposée au paragraphe 4.2.2.

Les paragraphes suivants décrivent les méthodes à utiliser pour chaque cas. Les équations utilisées dans les différentes étapes sont détaillées dans la Section 5.

4.3.1 Cas d'un écoulement dénoyé proche du seuil de dérivation

Deux configurations sont représentatives de ce cas de figure :

- Le moulin se situe au droit ou à proximité immédiate du seuil de dérivation (Figure 4.7) ;
- La vanne d'entrée du canal d'amenée ou tout ouvrage situé à cet endroit (seuil...) a un écoulement dénoyé (Figure 4.8).

Dans ces deux cas, l'écoulement dénoyé est localisé à l'amont de l'installation. Le calcul du débit maximum dérivable se fera à partir d'une équation d'ouvrage en écoulement dénoyé et de la cote de l'eau à l'amont de celui-ci (Voir l'équation 5.6 page 45 pour les déversoirs et les équations du paragraphe 5.3 page 46 pour les vannes et orifices). Dans ce cas-ci la cote est connue : il s'agit de la cote normale de fonctionnement généralement égale à la cote du seuil de dérivation.

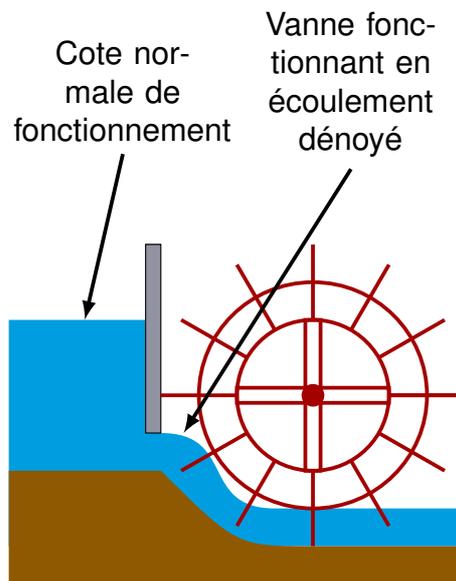


FIGURE 4.7 – Profil en long d'un moulin situé au droit du seuil

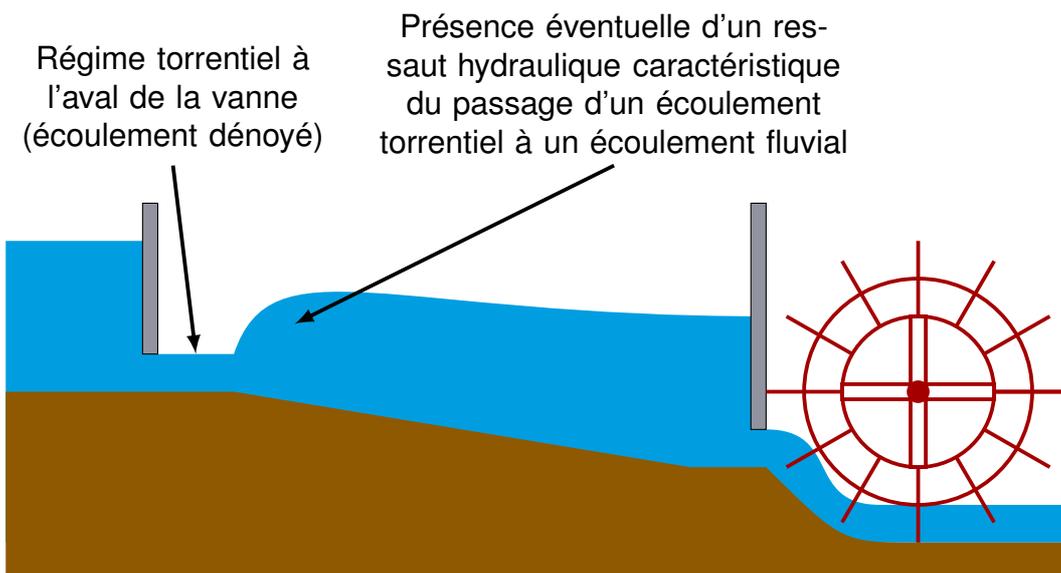


FIGURE 4.8 – Profil en long d'un moulin avec vannes d'entrée du canal d'amenée en écoulement dénoyé

4.3.2 Cas d'un canal d'amenée limitant le débit dérivé

Dans le cas où l'on n'a pas constaté d'écoulement dénoyé à l'amont du canal comme évoqué au paragraphe 4.3.1, si le canal d'amenée possède une portion avec des caractéristiques constantes² sur une longueur conséquente et que la ligne d'eau n'est visiblement pas influencée par l'aval, on se trouvera dans le cas d'un régime uniforme.

La figure 4.9 illustre ce cas de figure.

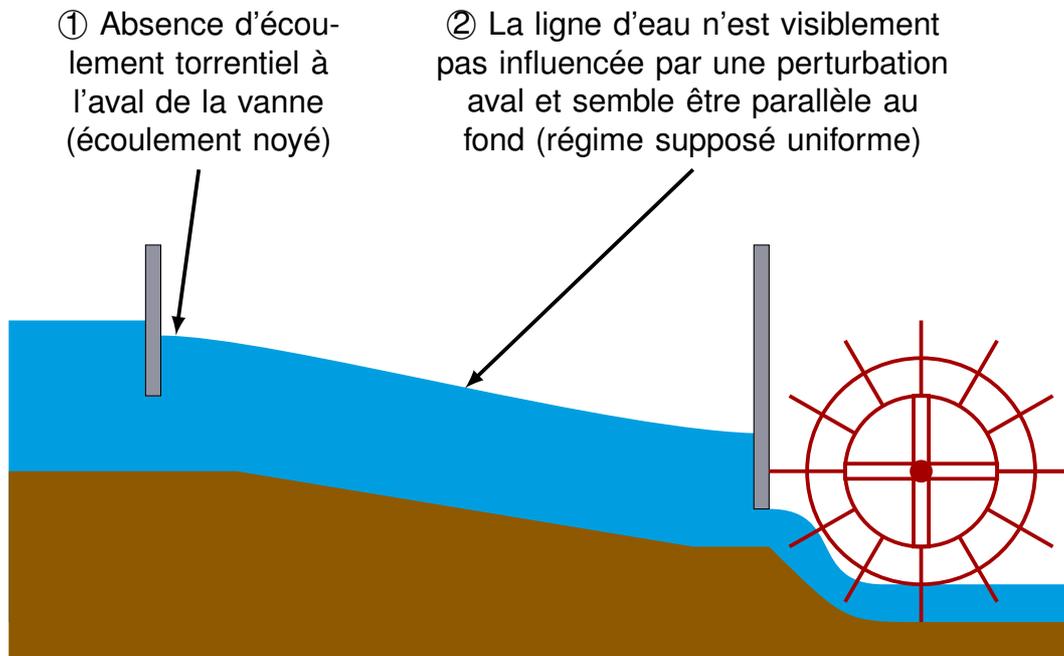


FIGURE 4.9 – Schéma du profil en long d'un moulin avec un canal d'amenée limitant le débit

On remarquera que pour ne pas être influencé par le niveau d'aval, il faut soit que la pente du fond du bief soit importante, soit que le bief ait une longueur conséquente de façon à ce que la différence de cote de l'eau entre l'amont et l'aval soit suffisante. Il n'existe d'ailleurs pas de régime uniforme pour un bief à pente nulle ou à contre-pente.

Le régime uniforme permet d'utiliser une formule reliant les caractéristiques de la section (géométrie du profil en travers, pente, rugosité) avec la hauteur d'eau et le débit. On peut donc déduire le débit à partir de la hauteur d'eau relevée sur la portion en régime uniforme.

Si la portion de bief en régime uniforme remonte jusqu'au droit du seuil de dérivation, la hauteur d'eau à prendre en compte correspond à la cote normale de fonctionnement.

Dans le cas contraire, il faut relier la hauteur d'eau de la portion en régime uniforme à la cote normale de fonctionnement en calculant la ligne d'eau entre ces deux points.

Dans l'exemple illustré par la Figure 4.9, il faut prendre en compte la perte de charge occasionnée par l'éventuelle présence de vannes d'entrée du canal d'amenée et relier la courbe de remous située entre la vanne et la zone en régime uniforme. Il n'existe pas de solution analytique à ce problème qui ne peut être résolu que par itérations successives.

Voici un algorithme itératif qui permet de calculer le débit sur la portion en régime uniforme dans le cas complexe de l'exemple de la Figure 4.9 :

2. Par caractéristiques constantes, on entend un débit constant (pas de fuites ni d'apports), un profil en travers de section inchangé sur la portion, une nature des parois qui est constante (rugosité constante) et une pente constante.

- ① Choisir un débit vraisemblable pour initier le calcul.
- ② Calculer la hauteur normale à l'amont de la portion du bief en régime uniforme à l'aide d'une formule de calcul de la hauteur normale à partir des caractéristiques physiques de la section et le débit choisi.
- ③ Calculer la courbe de remous entre l'amont de la portion en régime uniforme et l'aval de la vanne à l'aide d'une équation calculant la courbe de remous. Cette équation utilise les caractéristiques physiques des sections dont les hauteurs d'eau sont calculées successivement de l'aval vers l'amont avec pour point de départ la hauteur d'eau calculée en ②.
- ④ Calculer la hauteur à l'amont de la vanne d'entrée à l'aide d'une équation de débit d'une vanne en régime noyé et qui utilisera les caractéristiques physiques de la vanne, la hauteur aval calculée en ③ et le débit.
- ⑤ Comparer la hauteur obtenue en ④ avec la cote normale de fonctionnement. Si la hauteur obtenue est égale à une marge d'erreur acceptable près à la cote normale de fonctionnement, le débit utilisé pour le calcul est le débit maximum dérivable. Si la hauteur obtenue est supérieure, il faut réviser le débit à la baisse, si elle est inférieure, il faut augmenter le débit et, dans ces deux cas, réitérer le calcul à partir du point ② avec ce nouveau débit.

4.3.3 Cas d'un débit contrôlé par la vanne motrice et le canal d'amenée

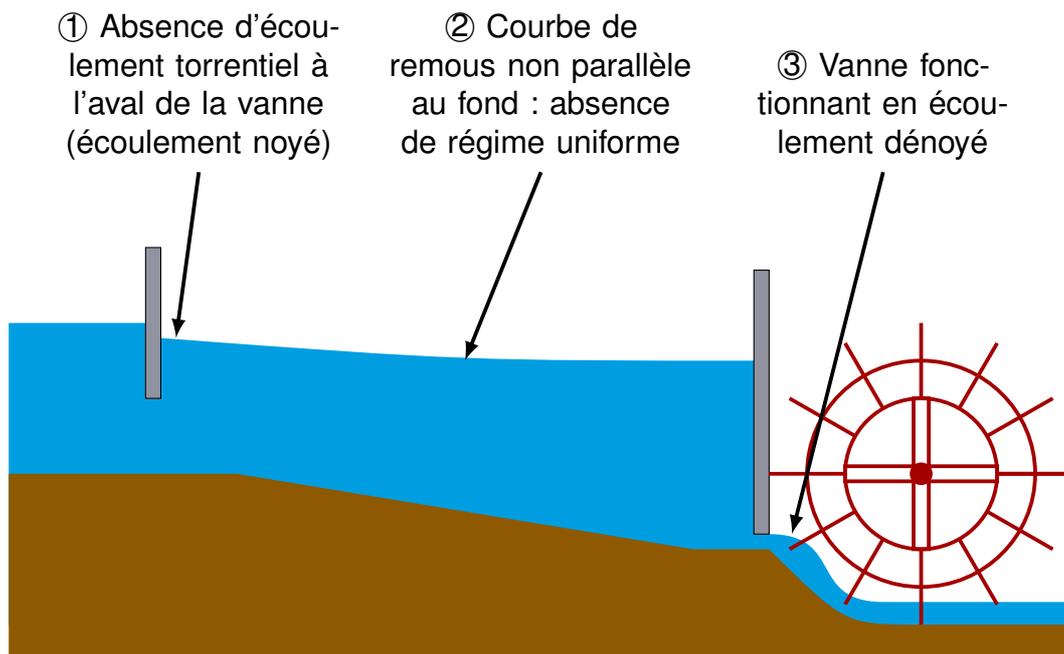


FIGURE 4.10 – Schéma du profil en long d'un moulin où le débit est contrôlé par la vanne motrice et le canal d'amenée

Considérons le cas où les vannes motrices en position complètement ouverte, ou l'organe quel qu'il soit (orifice, seuil...), régulant le débit à l'amont immédiat de la roue soit limitant par rapport au reste de l'installation comme illustré à la Figure 4.10. La recherche de la section de contrôle nous conduit à trois constats :

- ① La vanne d'entrée du canal d'amenée a un écoulement en régime noyé, le niveau de l'eau à l'aval de la vanne aura une influence sur le débit : elle n'est pas section de contrôle.

- ② La ligne d'eau du canal d'amenée n'est pas parallèle au fond. Cette ligne d'eau forme ce qu'on appelle une courbe de remous qui est influencée par le frein à l'écoulement constitué par la vanne motrice.
- ③ L'aval de la vanne motrice présente un écoulement dénoyé. Le niveau d'eau aval n'influence pas le débit, nous sommes donc en présence de la section de contrôle de cette installation.

Le débit pourra être calculé à partir des caractéristiques physiques de la vanne motrice et de la hauteur d'eau au niveau de la vanne. Comme dans le cas du paragraphe 4.3.2, il faut relier la hauteur d'eau au niveau de la vanne avec la cote normale de fonctionnement. La méthode de calcul est basée sur le même principe que celle exposée au paragraphe 4.3.2 :

- ① Choisir un débit vraisemblable pour initier le calcul.
- ② Calculer la hauteur à l'amont de la vanne motrice à l'aide d'une formule de vanne ou de seuil en écoulement dénoyé et utilisant les caractéristiques physiques de cet ouvrage et le débit choisi.
- ③ Calculer la courbe de remous entre l'amont de la vanne motrice et l'entrée du canal d'amenée à l'aide d'une équation calculant la courbe de remous. Cette équation utilise les caractéristiques physiques des sections dont les hauteurs d'eau sont calculées successivement de l'aval vers l'amont avec pour point de départ la hauteur d'eau calculée en ②.
- ④ Si le canal d'amenée possède une vanne d'entrée, calculer la hauteur à l'amont de la vanne d'entrée à l'aide d'une équation de débit d'une vanne en régime noyé et qui utilisera les caractéristiques physiques de la vanne, la hauteur aval calculée en ③ et le débit.
- ⑤ Comparer la hauteur obtenue avec la cote normale de fonctionnement. Si la hauteur obtenue est égale à une marge d'erreur acceptable près à la cote normale de fonctionnement, le débit utilisé pour le calcul est le débit maximum dérivable. Si la hauteur obtenue est supérieure, il faut réviser le débit à la baisse, si elle est inférieure, il faut augmenter le débit et, dans ces deux cas, réitérer le calcul à partir du point ② avec ce nouveau débit.

4.4 Que faire si la section de contrôle n'est plus dans son état d'origine ?

Le calcul du débit dérivable à partir des caractéristiques actuelles des installations pose un problème sur tous les sites où la section de contrôle n'est plus dans son état d'origine. C'est malheureusement le cas sur toutes les installations où la section de contrôle se situe au niveau des anciennes vannes motrices et où ces vannes voire la roue du moulin ont disparu ou ont été remplacées par une turbine.

Dans les cas d'une ancienne roue à aubes, l'absence de vanne motrice et de roue va conduire à un régime hydraulique comparable à celui de la Figure 4.11. On voit qu'en l'absence de vannes motrices, les conditions hydrauliques conduisent à une situation où la roue ne pourrait pas fonctionner car le niveau d'eau dépasse la cote de l'axe de la roue.

Que ce soit pour une roue de côté ou une roue en-dessous, le moulin pour fonctionner a nécessairement besoin d'une vanne motrice qui va guider le jet en dessous de l'axe de la

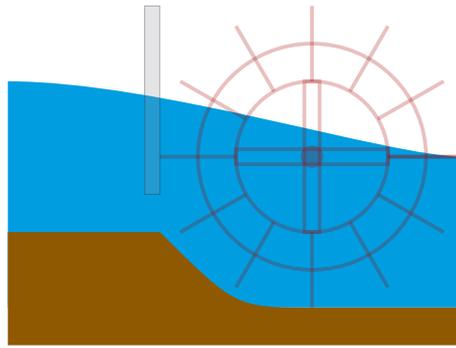
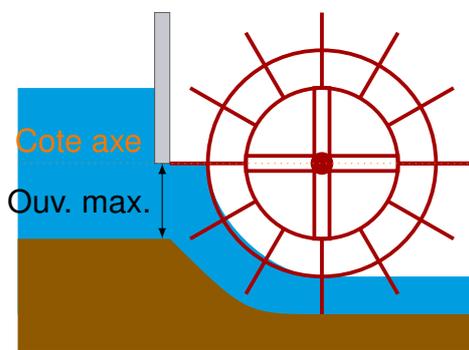
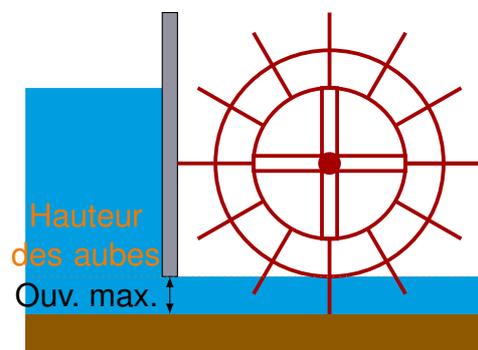


FIGURE 4.11 – Profil en long d'un moulin sans vanne motrice ni roue

roue pour une roue de côté (Figure 4.12a) et au niveau des aubes pour la roue en-dessous (Figure 4.12b).



(a) Roue de côté : ouverture limitée à la cote de l'axe de la roue



(b) Roue en dessous : ouverture limitée à la taille des aubes

FIGURE 4.12 – Ouverture maximale de la vanne motrice pour les roues de côté et en dessous

Il est donc possible de reconstituer un débit réaliste lorsqu'il reste des éléments permettant d'identifier la cote de la roue et ses caractéristiques. En l'absence de toute possibilité de reconstituer la géométrie des installations d'origine, le calcul par modélisation de la consistance légale à partir des éléments existants ne pourra pas donner un résultat cohérent et fournira des valeurs surestimant largement le débit par rapport à celui existant dans la configuration d'origine. Il faut alors se tourner vers les autres méthodes de détermination du débit développées aux Chapitres 2 et 3.

5 Formules utilisées pour le calcul du débit

Les cas rencontrés au Chapitre 4.3 nécessitent un calcul qui permet de relier le débit à une cote à l'amont d'un ouvrage (seuil, orifice...) ou à l'amont d'une portion de bief. Le calcul de la cote de l'eau à l'amont d'une portion de bief s'effectuera soit avec la formule du régime uniforme (5.1.3), soit à partir du calcul d'une courbe de remous (5.1.4) dans le cas où le niveau d'eau est graduellement varié.

Des singularités telles que des déversoirs, des orifices ou des vannes nécessitent l'utilisation de formules calculant la perte de charge au niveau de cette singularité. Les formules de déversoirs (5.2) sont utilisées au passage d'un obstacle où l'écoulement est à surface libre. A contrario, les formules d'orifice ou de vanne (5.3) sont appliquées lorsque l'écoulement s'effectue en charge à travers l'obstacle.

5.1 Calcul de la ligne d'eau sur une portion de bief

5.1.1 Définition des variables de l'écoulement à surface libre

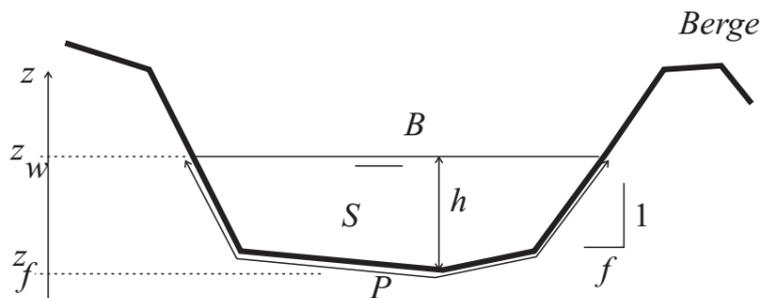


FIGURE 5.1 – Variables dans une section d'écoulement à surface libre (Extrait de BAUME, BELAUD et VION, 2013)

Les équations de l'hydraulique à surface libre font intervenir des grandeurs qui sont illustrées dans la Figure 5.1 et définies ci-dessous :

Cote de l'eau (z_w) : altitude (selon l'axe vertical z) de la surface libre (en m). La pente de la surface libre par rapport à l'axe horizontal de l'écoulement sera notée I .

Cote du fond (z_f) : altitude (selon l'axe vertical z) du point le plus bas de la section d'écoulement (en m). La pente du fond par rapport à l'axe horizontal de l'écoulement sera noté I_f .

Hauteur d'eau (h) : $h = z_w - z_f$. On pourra aussi utiliser les termes tirant d'eau ou profondeur pour cette grandeur (en m).

Section mouillée (S) : Lorsqu'on se place dans une section perpendiculaire à l'axe de l'écoulement, la surface du fluide selon ce plan est appelée la section mouillée (en m^2).

Périmètre mouillé (P) : Pourtour de la section mouillée en contact avec le lit du cours d'eau (en m).

Rayon hydraulique (R_h) : $R_h = S/P$ (en m).

Largeur au miroir (B) : largeur de la section mouillée au niveau de la surface libre (en m).

La section du canal d'amenée d'un moulin sera le plus souvent rectangulaire ou pourra être considérée comme telle. Dans ce cas, les variables définies ci-dessus auront les formulations suivantes :

$$S = B \times h \quad P = 2h + B \quad R = \frac{B \times h}{2h + B} \quad (5.1)$$

5.1.2 Calcul de la hauteur critique (h_c)

Parmi les sections de contrôle possibles, le régime critique est celui que l'on rencontre sur les ruptures de pente où l'écoulement passe du régime fluvial au régime torrentiel (Voir les régimes d'écoulement, Section 4.1.2 page 4.1.2). En tant que section de contrôle, il est possible sous ce régime de relier directement le débit Q_c à la hauteur d'eau dite critique h_c .

La formule de calcul du débit critique est la suivante ¹ :

$$Q_c = \sqrt{\frac{gS^3}{B}} \quad (5.2)$$

Avec g , l'accélération de la pesanteur terrestre qui vaut $9,81 \text{ m/s}^2$.

Pour une section rectangulaire, en utilisant les équations 5.1, on simplifie le calcul de Q_c et on obtient une solution analytique au problème du calcul de h_c :

$$Q_c = B\sqrt{gh_c^3} \quad (5.3)$$

$$h_c = \sqrt[3]{\frac{Q_c^2}{gB^2}} \quad (5.4)$$

Pour des sections de forme plus complexe, on pourra se reporter au module de « calculs hydrauliques sur une section paramétrée » présent sur le site internet <http://hydraulique.g-eau.net>.

5.1.3 Calcul du débit en régime uniforme (formule de Manning-Stricker)

La section de contrôle en régime uniforme a été décrite dans la Section 4.1.3 page 24. La méthode de calcul du débit maximum dérivable pour une installation dont la section de contrôle est une portion du canal d'amenée en régime uniforme est décrite dans la Section 4.3.2 page 30.

1. Cette équation est issue de l'équation 10.5 du nombre de Froude qui est égal à un dans le cas d'un régime critique

5.1.3.1 La formule de Manning-Strickler

La formule de Manning-Strickler donne une formulation directe du débit Q en fonction de la rugosité K , de la hauteur d'eau h dont dépendent S et R_h , et de la pente du fond I_f .

$$Q = KR_h^{2/3} S \sqrt{I_f} \quad (5.5)$$

La rugosité déterminée par le coefficient de Strickler K (en $m^{1/3}/s$) varie en fonction de la nature des parois du canal. Un formulaire des valeurs usuelles de K est présent à l'annexe 10.4 page 92.

Pour une section rectangulaire, on remplacera S et R_h par les formules de l'équation 5.1 page 35.

Cette formulation directe n'est valable que pour le cas où le régime uniforme est constaté à l'entrée du canal d'amenée et que l'on peut considérer que la cote de l'eau du régime uniforme est égale à la cote normale de fonctionnement.

On remarquera que même pour une section rectangulaire, il n'existe pas de solution analytique pour calculer h en fonction de K , I_f et Q . Il faudra utiliser une méthode de résolution numérique.

Le site internet <http://hydraulique.g-eau.net> propose un formulaire de calcul en ligne permettant de résoudre cette équation y compris pour les sections trapézoïdales, circulaires ou paraboliques.

5.1.3.2 Exemple de calcul : sensibilité de la formule pour une pente faible

Une précaution particulière devra être apportée à la pente du fond utilisée dans la formule. Les canaux d'amenée sont le plus souvent quasiment plats et la formule est très sensible à ce paramètre dans ces conditions.

Prenons l'exemple d'un canal d'amenée considéré en régime uniforme et ayant les caractéristiques suivantes :

- Canal rectangulaire de 4 mètres de large et de 50 mètres de long ;
- Le revêtement du canal est en terre avec des irrégularités ;
- Le dénivelé du canal sur 50 mètres se situe entre 2,5 et 10 cm soit une pente comprise entre 0,5 pour mille et 2 pour mille ;
- La cote normale de fonctionnement correspond à une hauteur d'eau de 80 cm en entrée de canal.

Selon l'annexe 10.4 page 92, la valeur du coefficient de Strickler pour un canal en terre avec des irrégularités est de 40.

La Figure 5.2 montre la façon de remplir le formulaire de calcul du régime uniforme du site <http://hydraulique.g-eau.net> afin d'obtenir le résultat de ce calcul.

Sur la Figure 5.3 on observe que pour cette incertitude de 7,5 centimètres de dénivelée pour 50 m de longueur de canal, le débit calculé va varier du simple au double.

En fait, comme nous le verrons au paragraphe suivant, lorsque la pente est très faible, le régime uniforme ne peut s'établir qu'après une distance relativement longue. Sur un canal horizontal ou à contre-pente, le régime uniforme ne peut pas s'établir et la formule ne peut en aucun cas être utilisée.

Calculs hydrauliques sur une section paramétrée

Calcul du régime uniforme

Courbes de remous

Lechapt et Calmon

Ouvrages

Documentation des calettes pour l'hydraulique

Loi de perte de charge dans une conduite distributrice

Calcul des paramètres hydrauliques dans le cas d'un régime uniforme (Documentation)

Type de section

Choix du type de section Rectangulaire

Définition de la section rectangulaire

	Paramètre fixé	Paramètre à varier	Paramètre à calculer
Largeur au fond (m) 4	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Caractéristiques du bief

	Paramètre fixé	Paramètre à varier	Paramètre à calculer
Coefficient de Strickler ($m^{2/3}s^{-1}$) 40	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Pente du fond (m/m) 0.001	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
		De la valeur minimum : 0.0005	
		A la valeur maximum : 0.002	
		Avec un pas de variation de : 0.0001	
Hauteur de berge (m) 2	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Caractéristiques hydrauliques

	Paramètre fixé	Paramètre à varier	Paramètre à calculer
Débit (m^3/s) 1.2	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Tirant d'eau (m) 0.8	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Paramètres de calcul

Précision de calcul(m) 0.001

Calculer

FIGURE 5.2 – Formulaire de calcul du régime uniforme (Source : <http://hydraulique.g-eau.net>)

5.1.4 Calcul d'une courbe de remous

5.1.4.1 Résolution de l'équation de la courbe de remous

Le calcul de la courbe de remous décrite Section 4.3.2 page 30 nécessite la résolution d'une équation différentielle. Cela signifie que la ligne d'eau est calculée de proche en proche de l'aval vers l'amont dans le cas d'un écoulement fluvial à partir d'une cote de l'eau située à l'aval.

Cette équation est décrite à l'annexe 10.5 page 97, elle peut éventuellement être résolue à l'aide d'un tableur dans le cas rectangulaire mais cela revient tout de même à effectuer des calculs relativement complexes et répétitifs.

Le site internet <http://hydraulique.g-eau.net> propose un formulaire de calcul en ligne permettant de résoudre cette équation y compris pour les sections trapézoïdales, circulaires ou paraboliques.

5.1.4.2 Exemple pratique de calcul d'une courbe de remous

Reprenons l'exemple de la Section 5.1.3 en considérant que la pente du canal est de 1 pour mille. L'objectif, illustré dans la Figure 5.4, va être de trouver le débit Q permettant de raccorder une courbe de remous, calculée à partir des caractéristiques du canal, à la

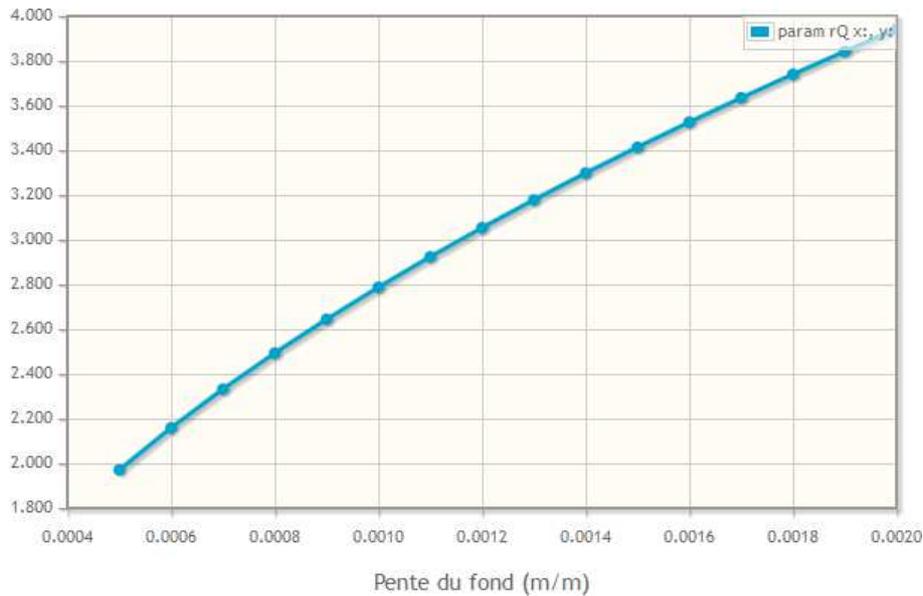


FIGURE 5.3 – Exemple de calcul du débit en fonction de la pente en régime uniforme (Source : <http://hydraulique.g-eau.net>)

cote normale de fonctionnement qui dans notre exemple correspond à une hauteur d'eau de 80 cm à l'amont du canal.

Une courbe de remous en régime fluvial se calcule de l'aval vers l'amont, une hauteur d'eau à l'aval est donc nécessaire pour initier le calcul. Dans cet exemple, le moulin dans son état actuel se présente comme un seuil dénoyé d'une largeur supérieure à celle du canal. Ce seuil correspond à une section de contrôle où la ligne d'eau va passer par la hauteur critique.

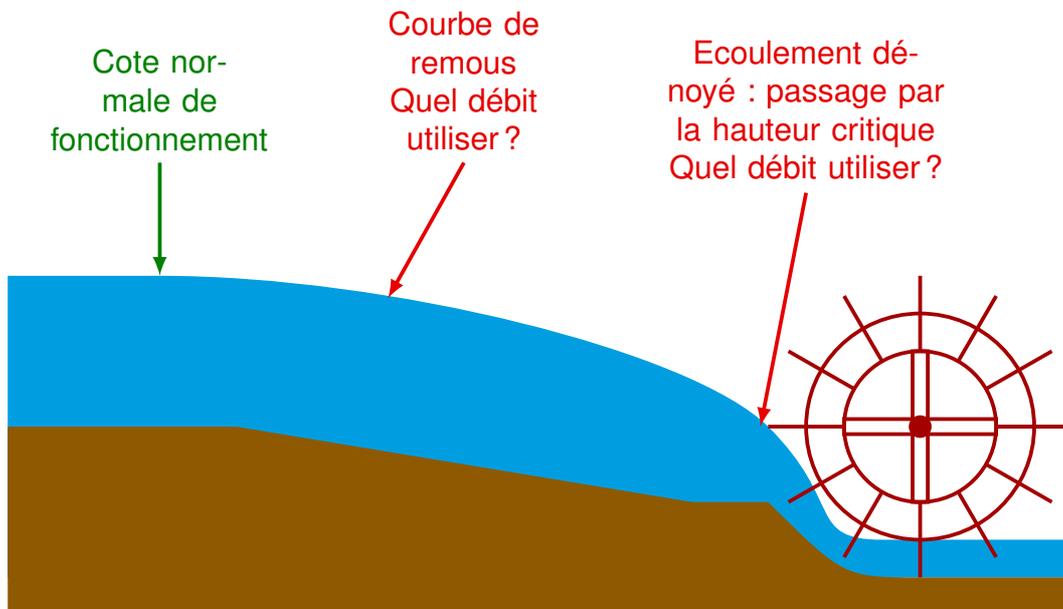


FIGURE 5.4 – Schéma du problème du calcul d'une courbe de remous

La section de contrôle étant identifiée, nous allons procéder selon la méthode proposée Section 4.3.3 page 31. Il s'agit d'un calcul itératif où nous allons dans l'ordre :

1. Choisir un débit pour initier le calcul ;

2. Calculer la hauteur critique h_c à l'aval à l'aide de la formule 5.4 ;
3. Calculer la courbe de remous avec h_c comme condition limite aval ;
4. Comparer la hauteur d'eau obtenue à l'amont avec la hauteur correspondant au fonctionnement normal et réitérer le calcul avec un nouveau débit si nécessaire.

Comme le canal est d'une certaine longueur, on peut faire l'hypothèse qu'il est suffisamment long pour que le régime uniforme s'installe à l'amont et le débit à trouver serait alors celui proposé Section 5.1.3. Sur le graphique de la Figure 5.3, on observe que pour une pente de 1 pour mille, le débit est de 2,8 m³/s.

Pour calculer la hauteur critique à l'aval en fonction du débit, on peut utiliser le module de « Calculs hydrauliques sur une section paramétrée » disponible sur <http://hydraulique.g-eau.net>. En remplissant le formulaire comme illustré à la Figure 5.5, on obtient en une seule étape le résultat du calcul de la hauteur critique pour toute la gamme de débit qui nous intéresse (Figure 5.6). Pour un débit de 2,8 m³/s, la hauteur critique est de 0,368 m.

Il est maintenant nécessaire d'utiliser cette hauteur comme point de départ du calcul de la courbe de remous. La hauteur d'eau imposée à l'aval doit être strictement supérieure à la hauteur critique h_c . Pour éviter les problèmes d'arrondi, on va surélever la hauteur obtenue à l'étape 2 d'un millimètre afin d'être sûr que la valeur utilisée est strictement supérieure à h_c .

Réalisons le calcul à l'aide du formulaire de calcul d'une courbe de remous (<http://hydraulique.g-eau.net>) en saisissant les données dans le formulaire tel qu'illustré à la Figure 5.7.

La Figure 5.8 montre le résultat obtenu à l'aide des données rentrées dans le formulaire. La hauteur d'eau résultante à l'amont est de 61,2 cm. Il faut garder en tête que ce calcul est approximatif et que sa précision dépend des paramètres de calcul : la méthode de résolution, le pas de discrétisation, et la précision utilisée dans les calculs. Ces trois paramètres sont modifiables sur le formulaire. La méthode de résolution « intégration par trapèzes » est la méthode la plus précise proposée. Pour gagner en précision, on pourra diminuer le pas de discrétisation et augmenter la précision de calcul. En effectuant différent test, on remarque qu'à partir d'un pas de discrétisation de 1 m et une précision de 0,0001 m, la hauteur d'eau à l'amont se stabilise à 60,9 cm. Nous garderons ce pas et cette précision pour les prochains calculs.

Comparons la hauteur obtenue avec la hauteur normale de fonctionnement : $h_{amont} = 60,9 \text{ cm} < 80,0 \text{ cm}$. Le débit choisi initialement est donc insuffisant, il faut réitérer le calcul. Le tableau 5.1 récapitule les itérations de calcul permettant d'obtenir le débit correspondant à une hauteur normale de fonctionnement de 80 cm.

TABLE 5.1 – Tableau des calculs itératifs de l'exemple de calcul d'une courbe de remous

Itération	Débit Q (m ³ /s)	h_c (m)	h_c corrigé (m)	h_{amont} (m)
1	2.8	0.368	0.369	0.609
2	4.0	0.467	0.468	0.747
3	4.5	0.505	0.506	0.799
4	4.6	0.513	0.514	0.810

En très peu d'itérations, on finit par trouver un débit de 4,5 m³/s.

Calcul des grandeurs hydrauliques caractéristiques sur une section paramétrée(Documentation)

Type de section		
Choix du type de section	Rectangulaire	

Définition de la section rectangulaire		
	Paramètre fixé	Paramètre à varier
Largeur au fond (m)	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
<input type="text" value="4"/>		

Caractéristiques du bief		
	Paramètre fixé	Paramètre à varier
Coefficient de Strickler ($m^{1/3}s^{-1}$)	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
<input type="text" value="40"/>		
Pente du fond (m/m)	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
<input type="text" value="0.001"/>		
Hauteur de berge (m)	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
<input type="text" value="1"/>		

Caractéristiques hydrauliques		
	Paramètre fixé	Paramètre à varier
Débit (m^3/s)	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
<input type="text" value="1.2"/>		
	De la valeur minimum :	<input type="text" value="1"/>
	A la valeur maximum :	<input type="text" value="5"/>
	Avec un pas de variation de :	<input type="text" value="0.1"/>
Tirant d'eau (m)	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
<input type="text" value="0.8"/>		

Paramètres de calcul	
Précision de calcul(m)	<input type="text" value="0.001"/>

Donnée à calculer	
Choix de la donnée à calculer	Le tirant d'eau critique (m)

FIGURE 5.5 – Formulaire de calcul de la hauteur critique en fonction du débit (Source : <http://hydraulique.g-eau.net>)

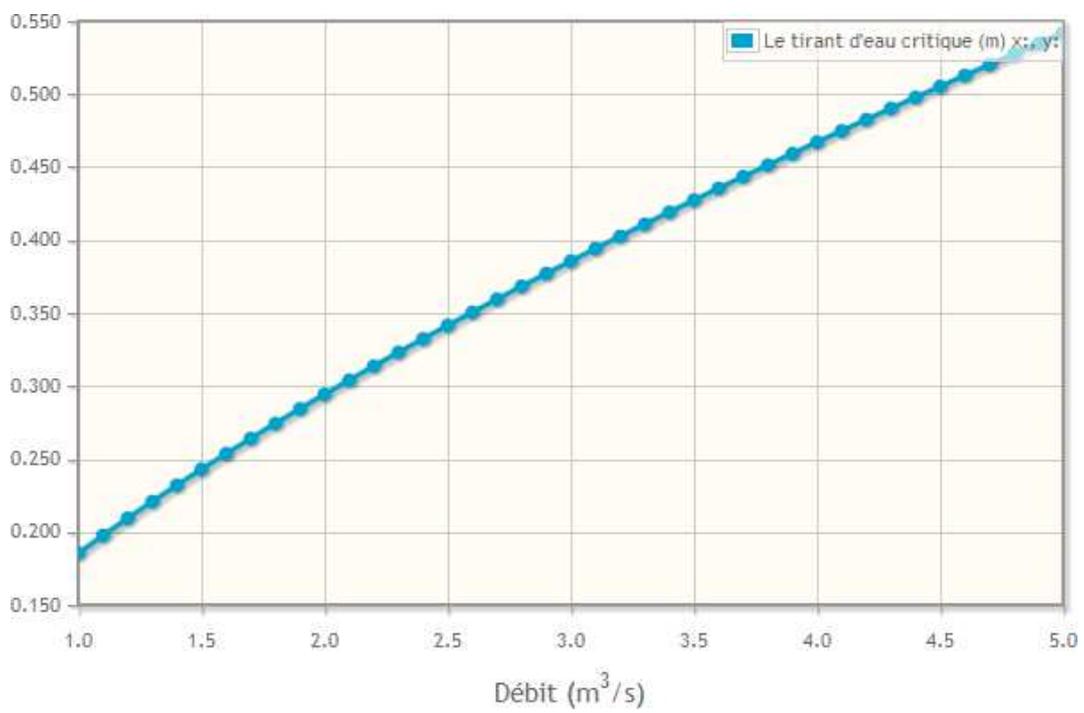


FIGURE 5.6 – Graphique du résultat du calcul de la hauteur critique en fonction du débit (Source : <http://hydraulique.g-eau.net>)

Calcul d'une courbe de remous par la méthode des trapèzes, de Runge Kutta ou d'Euler

Type de section	
Choix du type de section	Rectangulaire
Définition de la section rectangulaire	
Largeur au fond (m)	4
Caractéristiques du bief	
Coefficient de Strickler ($m^{1/3}s^{-1}$)	40
Longueur du bief (m)	50
Pente du fond (m/m)	0.001
Hauteur de berge (m)	1
Conditions aux limites	
Débit amont (m^3/s)	2.8
Tirant d'eau imposée à l'aval (m)	0.369
Tirant d'eau imposée à l'amont (m)	0.8
Paramètres de calcul	
Pas de discrétisation (m)	5
Précision de calcul et d'affichage des cotes (m)	0.001
Méthode de résolution	Intégration par trapèzes
Donnée à calculer	
Choix de la donnée à calculer	Aucune
<input type="button" value="Calculer"/>	

FIGURE 5.7 – Formulaire de calcul d'une courbe de remous (Source : <http://hydraulique.g-eau.net>)

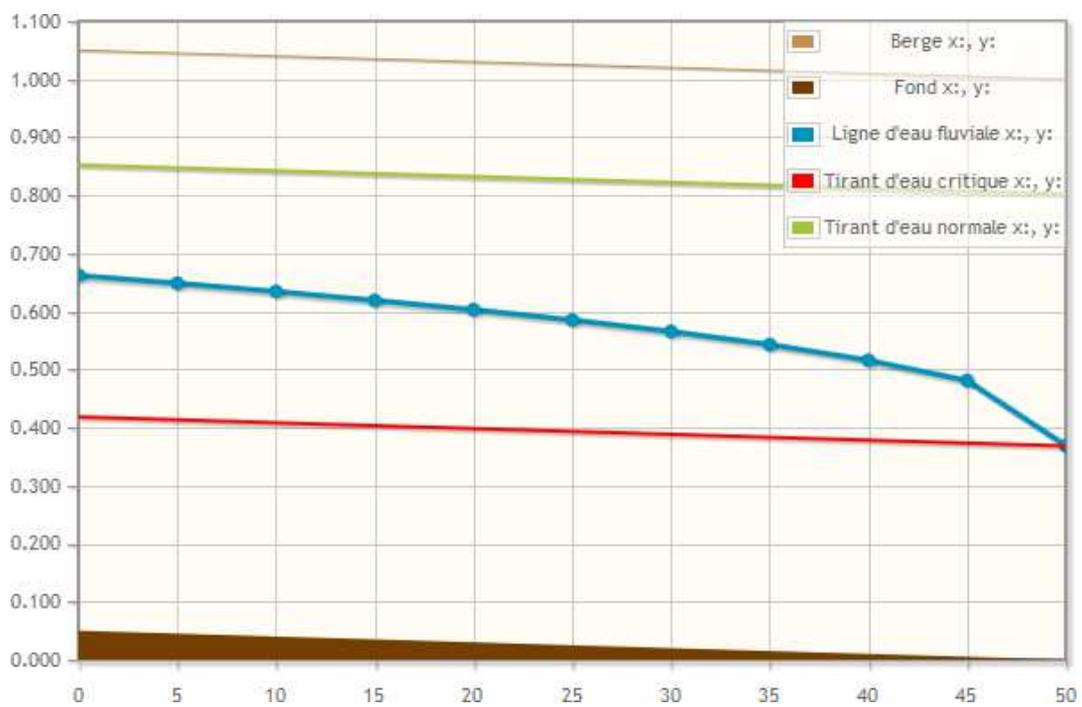


FIGURE 5.8 – Calcul d'une courbe de remous avec un pas de discrétisation de 5 mètres
 (Source : <http://hydraulique.g-eau.net>)

5.2 Calcul du débit d'un déversoir

5.2.1 Définition

Un déversoir est un orifice superficiel ouvert à sa partie supérieure et pratiqué dans une paroi généralement verticale. (CARLIER, 1972)

La conséquence de cette définition est que les formules de déversoir seront utilisées non seulement sur les seuils (voir Figure 5.9), mais aussi sur les vannes à partir du moment où la surface de l'eau ne touche pas la pelle de la vanne (Voir exemples Figure 5.10).

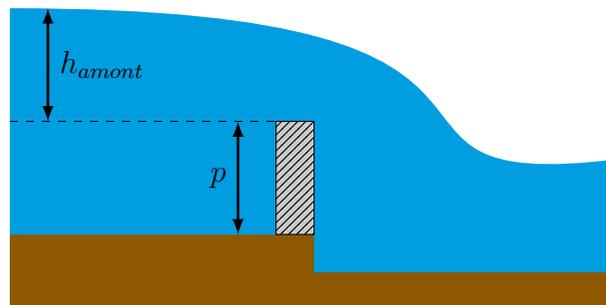


FIGURE 5.9 – Schéma d'un déversoir



(a) Vannes motrices du moulin de Roussel à Neschers (63) (Crédit : David Dorchie, Irstea)

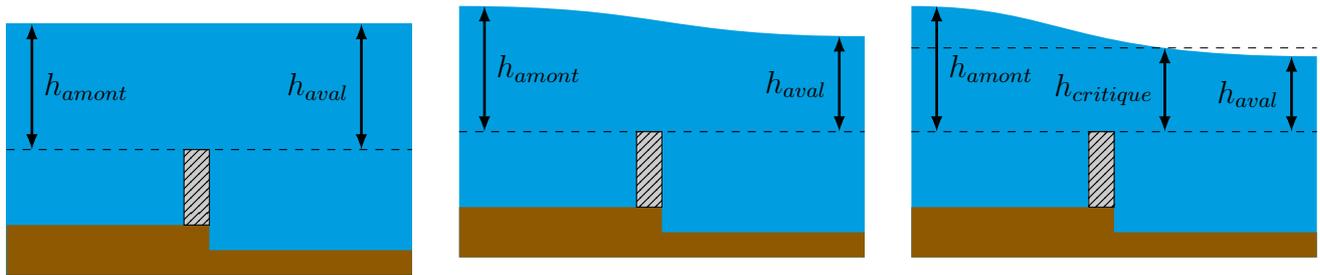


(b) Vannes du canal d'amenée de l'usine hydroélectrique de Bourguignon (25) (Crédit : David Dorchie, Irstea)

FIGURE 5.10 – Exemples de vannes où une formule de déversoir sera utilisée

On distingue différents types de déversoirs en fonction de leur forme mais les lois de comportement sont similaires. Le schéma Figure 5.9 représente la coupe longitudinale d'un déversoir qui est constitué d'un seuil, que l'on nommera encore crête ou radier, caractérisé éventuellement par une pelle p . La hauteur d'eau amont h_{amont} qui permettra le calcul du débit est mesurée entre la cote de la surface de l'eau et la cote du seuil.

5.2.2 Comment différencier l'écoulement noyé de l'écoulement dénoyé ?



(a) $h_{amont} = h_{aval}$: le débit est nul

(b) Le débit augmente quand h_{aval} diminue : l'écoulement est noyé

(c) Le débit n'augmente plus quand h_{aval} diminue : l'écoulement est dénoyé

FIGURE 5.11 – Schémas explicatifs des écoulements noyés et dénoyés sur un seuil

Pour bien comprendre l'influence du niveau aval sur le débit et le concept des écoulements noyés et dénoyés, réalisons une expérience avec un déversoir sur lequel le niveau d'eau amont est maintenu constant et le niveau aval est descendu progressivement :

- lorsque le niveau d'eau à l'amont est égal au niveau d'eau aval le débit est nul (Figure 5.11a) ;
- lorsque le niveau aval descend, le débit augmente : l'écoulement est noyé (Figure 5.11b) ;
- lorsque le niveau aval passe sous la hauteur critique, le débit a atteint un maximum et ne dépend plus du niveau aval : l'écoulement est dénoyé (Figure 5.11c).

Pour un seuil rectangulaire, la limite entre le régime noyé et dénoyé se situe à $h_{critique} = 2/3h_{amont}$:

- si $h_{aval} > 2/3h_{amont}$ le régime est noyé ;
- si $h_{aval} \leq 2/3h_{amont}$ le régime est dénoyé.

Pour calculer le débit Q à partir de h_{amont} et h_{aval} , il faut effectuer ce test pour savoir quelle équation utiliser. Pour calculer h_{amont} en fonction de Q et h_{aval} , il faut effectuer cette vérification a posteriori après avoir utilisé l'une ou l'autre des équations.

5.2.3 Formule du déversoir dénoyé

En régime dénoyé, le débit ne dépend que de la hauteur d'eau amont h_{amont} :

$$Q = C_d \sqrt{2g} L h_{amont}^{3/2} \quad (5.6)$$

Avec :

- Q le débit en m^3/s ;
- C_d le coefficient de débit ;
- g l'accélération de la pesanteur terrestre égale à $9,81 \text{ m/s}^2$;
- L la largeur du déversoir ;
- h_{amont} la hauteur d'eau à l'amont au dessus de la crête du déversoir en mètres.

Une valeur du coefficient de débit $C_d = 0.4$ est généralement une bonne approximation pour un seuil rectangulaire. Pour des formes de déversoir plus complexes (trapézoïdale, circulaire...) ou pour prendre en compte des caractéristiques du profil longitudinal (seuil à crête mince, à crête épaisse), on pourra se reporter à la notice sur les déversoirs du CETMEF (CETMEF, 2005).

5.2.4 Formule du déversoir noyé

En régime noyé, le débit dépend de la hauteur d'eau amont h_{amont} et de la hauteur aval h_{aval} :

$$Q = C'_d \sqrt{2g} L h_{aval} \sqrt{h_{amont} - h_{aval}} \quad (5.7)$$

La description des variables est la même que pour la formule du déversoir dénoyé (Section 5.2.3), à l'exception du coefficient de débit C'_d dont la valeur $C'_d = 1$ sera une bonne approximation. CETMEF, 2005 propose des formulations plus précises du cas noyé en fonction du type de seuil (crête mince, crête épaisse...).

5.3 Calcul du débit d'un orifice ou d'une vanne de fond

5.3.1 Définitions

Par opposition aux déversoirs, cette partie va s'intéresser aux écoulements s'effectuant en charge à travers un orifice ou un ajutage². Dans ce cas-ci, l'écoulement s'effectue à travers un ouvrage où l'écoulement ne s'effectue plus à surface libre, on parlera alors d'un écoulement en charge. Sur les moulins, on rencontrera deux types d'ouvrages avec un écoulement en charge : les orifices et les vannes de fond.

On pourra rencontrer des orifices sur les moulins à roue horizontale (roues à cuillère ou moulin à rodet) et plus particulièrement sur les moulins à cuve.

On rencontrera des vannes de fond à l'entrée des canaux d'amenée et comme vannes motrices. Cependant si on considère un débit maximum et une ouverture maximale de la vanne : la pelle n'est souvent plus en contact avec la surface de l'eau. On se retrouve alors dans le cas d'un écoulement à surface libre (par opposition à un écoulement en charge sous la vanne) et le calcul s'effectue avec une équation de déversoir.

Dans le cas d'une roue en dessous ou d'une roue de côté (Voir Figures 2.2 page 16), l'ouverture de la vanne est tout de même limitée à la hauteur des aubes pour une roue en dessous et à la cote de l'axe de la roue pour une roue de côté.

Comme les orifices et les vannes de fonds ne se rencontreront qu'au niveau de la roue et que l'écoulement à ce niveau sera toujours dénoyé, on ne décrit dans cette partie que les formules pour orifices et vannes de fond en écoulement dénoyé.

5.3.2 Formule des orifices et ajutages

La formule générale pour un orifice ou un ajutage dénoyé est la suivante (CARLIER, 1972) :

2. Un ajutage est un tuyau qu'on adapte à l'orifice d'écoulement d'un fluide sous pression pour modifier le débit ou la forme du jet

$$Q = C_d S \sqrt{2gH} \quad (5.8)$$

Avec :

- Q le débit en m^3/s ;
- C_d le coefficient de débit ;
- S la surface de l'orifice en m^2 ;
- g l'accélération de la pesanteur terrestre égale à $9,81 \text{ m/s}^2$;
- H la hauteur d'eau mesurée entre la surface de l'eau et le centre de l'orifice en mètres (Voir Figures 5.12).

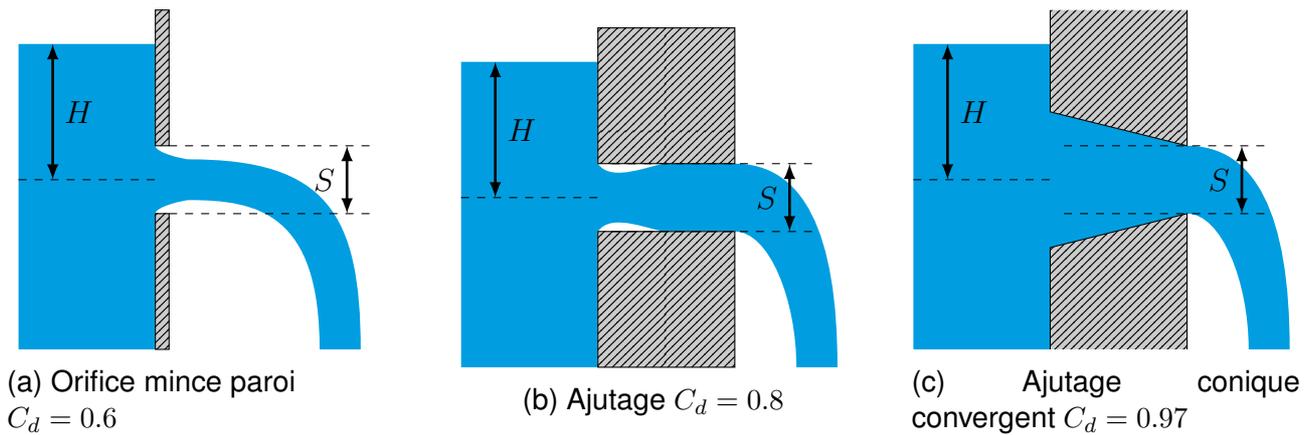


FIGURE 5.12 – Schémas explicatifs des écoulements à travers des orifices ou ajutages dénoyés

La surface S à prendre en compte est la section la plus réduite de l'orifice ou de l'ajutage (Figure 5.12c).

Le coefficient de débit C_d varie en fonction du type d'orifice ou d'ajutage. La Figure 5.12 présente les formes et les coefficients de débit les plus courants (Source CARLIER, 1972).

5.3.3 Formule pour une vanne de fond

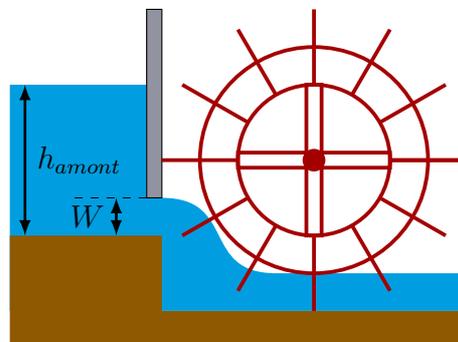


FIGURE 5.13 – Schéma d'une vanne de fond à l'amont d'une roue

La formule de calcul du débit pour une vanne de fond rectangulaire est la suivante (BAUME, BELAUD et VION, 2013) :

$$Q = C_d L W \sqrt{2gh_{amont}} \quad (5.9)$$

Avec :

- Q le débit en m^3/s ;
- C_d le coefficient de débit ;
- L La largeur en mètres ;
- W L'ouverture de la vanne en mètres (Voir Figure 5.13) ;
- g l'accélération de la pesanteur terrestre égale à $9,81 \text{ m/s}^2$;
- h_{amont} la hauteur d'eau à l'amont de la vanne en mètres (Voir Figure 5.13).

6 Cas d'étude

6.1 Moulin de Roussel sur la Couze Chambon à Neschers (Puy-de-Dôme)

6.1.1 Description du moulin

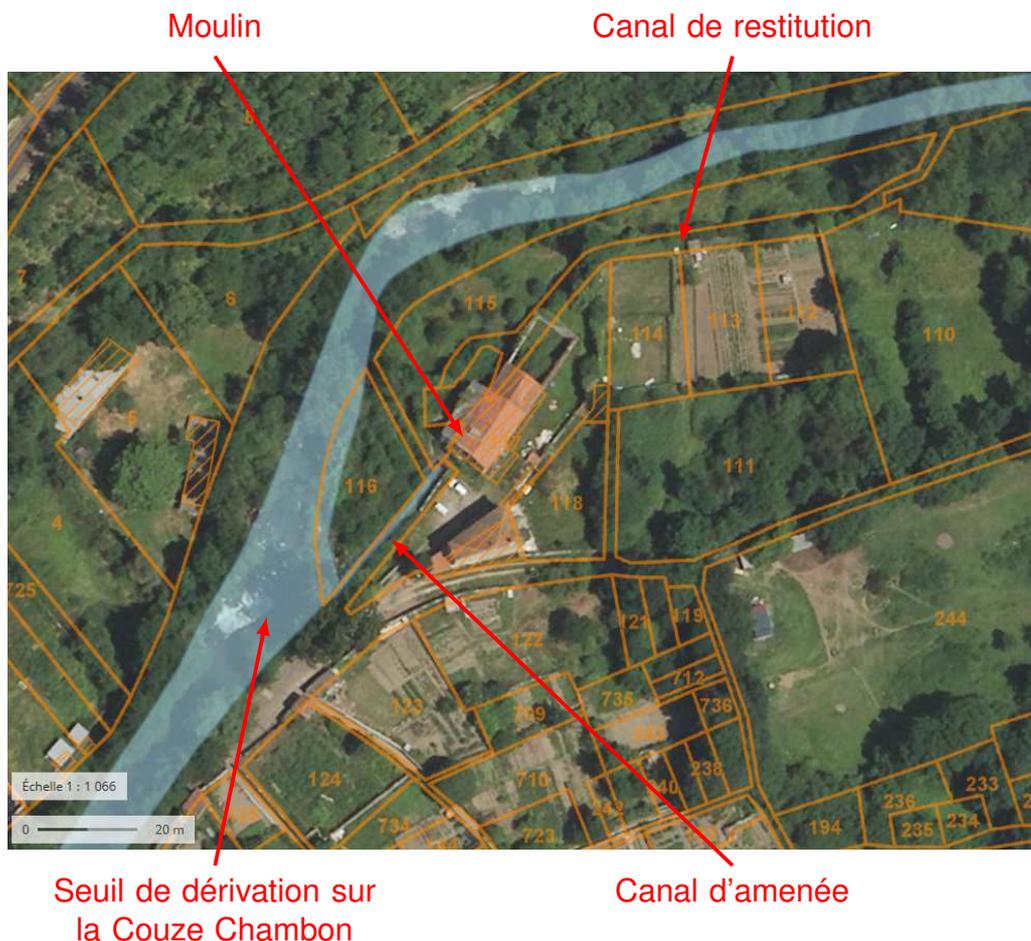


FIGURE 6.1 – Photographie aérienne du moulin de Roussel (Crédit : IGN)

Le moulin de Roussel est un moulin comprenant un canal d'amenée et un canal de restitution (Figure 6.1). La cote de la crête du seuil de dérivation qui correspond à la cote normale de fonctionnement a été estimée à 394,66 m NGF. L'entrée du canal d'amenée est pourvue de deux vannes totalisant une largeur de 2,80 mètres avec un radier situé à la cote 393,99 m NGF (Figure 6.2a). Le tirant d'eau au niveau des vannes d'entrée à la cote normale de fonctionnement est donc de 67 cm.

Le canal d'amenée constitué d'un fond en terre et de berges en pierres grossières a une largeur moyenne de 2,30 m pour une longueur de 30 m. Le canal est à contre-pente avec une cote de fond de 393,99 m NGF à l'amont et 394,10 m NGF à l'aval au niveau des vannes motrices soit une pente négative de 3,7 pour mille. Les deux vannes motrices font chacune 92 cm de large (Figure 6.2b) et régulent le débit de deux coursiers qui alimentaient deux roues par en dessous (Figure 6.2c).

Le canal de restitution rejoint la Couze-Chambon à la cote NGF 390,40 m.



(a) Seuil de dérivation et vannes en entrée du canal d'amenée



(b) Vannes motrices



(c) Roues du moulin

FIGURE 6.2 – Photographies du moulin de Roussel (Crédit : David Dorchies, Irstea)

6.1.2 Estimations du débit présentes dans le dossier

Un état statistique datant de 1899 mentionne ce moulin doté de deux paires de meules pour un débit de 569 L/s, une chute d'eau de 2,1 m et une force brute de 15,68 chevaux-vapeur.

Un bureau d'étude a estimé le débit maximum dérivable à 2 m³/s en se basant sur la section

d'écoulement estimée à $2,80 \times 0,70 = 2 \text{ m}^2$ à l'entrée du bief et en retenant arbitrairement une vitesse moyenne d'écoulement de 1 m/s.

6.1.3 Estimation du débit maximum dérivable par modélisation

La largeur des vannes motrices étant inférieure à celle du canal d'amenée et le canal d'amenée étant d'une longueur très faible et à contre-pente, on peut supposer que le contrôle hydraulique se situe au niveau des vannes motrices. Appliquons la méthode proposée au paragraphe 4.3.3 page 31 : l'objectif est de trouver le débit permettant de retrouver la cote normale de fonctionnement au niveau de la retenue à l'issue du calcul de la ligne d'eau des vannes motrices jusqu'à l'amont du canal d'amenée.

Voici le détail des opérations pour la première itération de calcul :

- ① Choisissons un débit de 600 L/s proche du débit relevé dans l'état statistique de 1899.
- ② Calculons la hauteur d'eau correspondante à l'amont des vannes motrices.
On considère qu'à l'aval des vannes motrices l'écoulement est torrentiel. De plus, on considère que les vannes sont pleinement ouvertes et la pelle des vannes n'est pas en contact avec la surface de l'eau. On utilise donc une équation de seuil rectangulaire en régime dénoyé. Avec l'outil de calcul aux ouvrages (<http://hydraulique.g-eau.net>), on peut à l'aide du formulaire Figure 6.3, calculer en une seule fois les cotes amont du seuil pour toute la gamme de débit qui nous intéresse (Voir graphique Figure 6.4).
Pour 600 L/s ($0,6 \text{ m}^3/\text{s}$), le tirant d'eau amont de la vanne motrice est de 0,324 m.
- ③ On calcule ensuite la courbe de remous jusqu'à l'amont du canal d'amenée pour lequel on va choisir les paramètres suivants (Voir le formulaire Figure 6.5) :
 - Section rectangulaire de largeur 2.30 m ;
 - Bief de 30 m de long avec une pente négative de 3,7 pour mille et un Strickler de 45 correspondant à une rugosité de canal en terre de taille moyenne selon l'annexe 10.4. La hauteur de berge (ici 1 m) doit être suffisamment haute pour éviter les débordements ;
 - Conditions aux limites : un débit de $0,6 \text{ m}^3/\text{s}$, un tirant d'eau aval de 0,324 m et un tirant d'eau amont de 0,670 m (ce tirant d'eau amont égal à celui de la cote normale de fonctionnement n'intervient pas dans le calcul, il permet seulement de contrôler qu'il ne correspond pas à un écoulement torrentiel à l'amont du bief) ;
 - Paramètres de calcul : un pas de discrétisation de 1 m et une précision de 0,001 m.

Le résultat du calcul renvoie un tirant d'eau à l'amont de 48,6 cm.

- ④ Le canal d'amenée possède deux vannes totalisant 2,80 m de large. Considérant que ces vannes sont entièrement ouvertes et qu'elles sont plus larges que le canal, on estime ici que les pertes de charges provoquées par ces vannes sont négligeables.
- ⑤ Le tirant d'eau obtenu au niveau de la retenue est donc égal à 48,6 cm. Cette valeur est inférieure à 67 cm qui est le tirant d'eau correspondant à la cote normale de fonctionnement. Il faut réitérer le calcul avec un débit supérieur.

Pour trouver le débit cible, nous allons procéder par dichotomie (voir description de la méthode Annexe 10.3).

A chaque itération de calcul, il faut pour chaque débit reproduire l'étape 2 permettant de calculer une nouvelle valeur de tirant d'eau à l'amont des vannes motrices, et ensuite il

Calcul d'ouvrages hydrauliques de type déversoirs, vannes, orifices...

Type d'ouvrage

Ouvrage :

Loi de débit :

Caractéristiques de l'ouvrage

	Paramètre à calculer	Paramètre à varier	Paramètre fixé
Largeur (m) : <input type="text" value="1.84"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Coefficient de débit : <input type="text" value="0.4"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>

Caractéristiques globales

Q: Débit (m³/s) :

De la valeur minimum :

A la valeur maximum :

Avec un pas de variation de :

Cote de l'eau à l'amont (m) : <input type="text" value="1.5"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Côte de l'eau à l'aval (m) : <input type="text" value="1"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>

Paramètres de calcul

Précision de calcul(m) :

FIGURE 6.3 – Formulaire de calcul de la cote amont des vannes motrices du moulin de Roussel en fonction du débit (Source : <http://hydraulique.g-eau.net>)

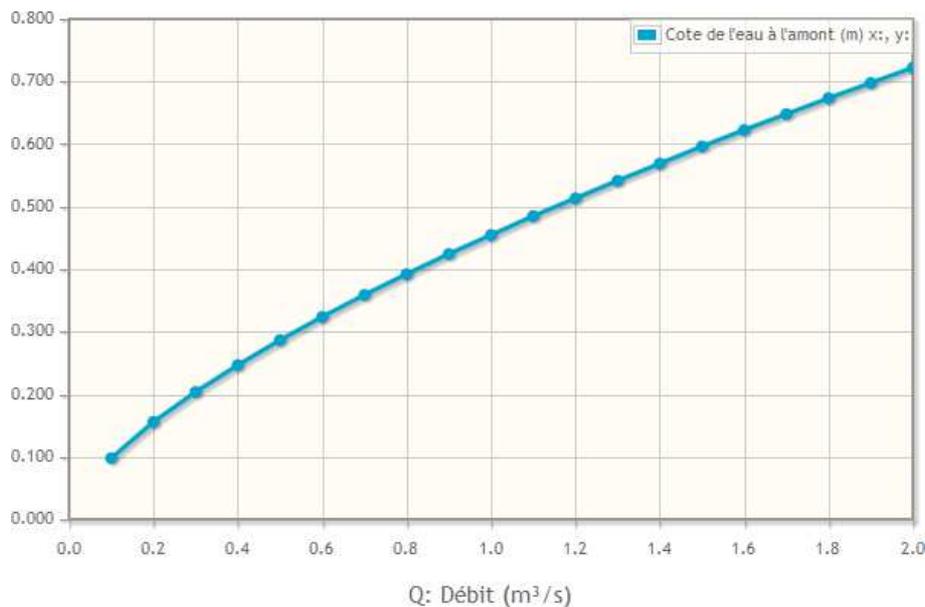


FIGURE 6.4 – Résultat du calcul de la cote amont des vannes motrices du moulin de Roussel en fonction du débit (Source : <http://hydraulique.g-eau.net>)

Calcul d'une courbe de remous par la méthode de Runge Kutta ou Euler explicite

Type de section

Choix du type de section Rectangulaire

Définition de la section rectangulaire

Largeur au fond (m) 2.3

Caractéristiques du bief

Coefficient de Strickler ($m^{1/3}s^{-1}$) 45

Longueur du bief (m) 30

Pente du fond (m/m) -0.0037

Hauteur de berge (m) 1

Conditions aux limites

Débit amont (m^3/s) 0.6

Tirant d'eau imposé à l'aval (m) 0.324

Tirant d'eau imposé à l'amont (m) 0.67

Paramètres de calcul

Pas de discrétisation (m) 1

Précision de calcul et d'affichage des cotes (m) 0.001

Méthode de résolution Intégration par trapèzes

Donnée à calculer

Choix de la donnée à calculer Aucune

Calculer

FIGURE 6.5 – Formulaire de calcul de la courbe de remous dans le canal d'amenée du moulin de Roussel (Source : <http://hydraulique.g-eau.net>)

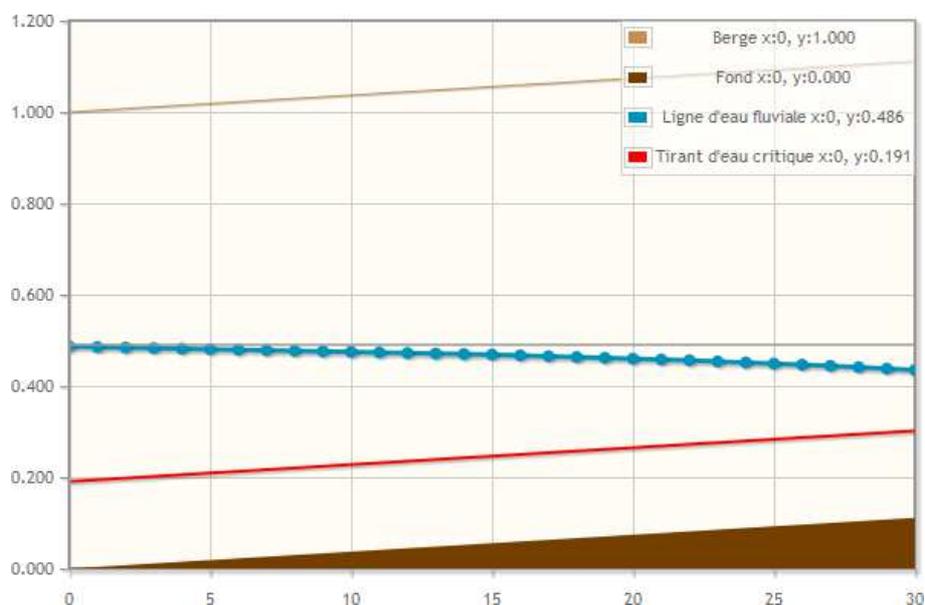


FIGURE 6.6 – Résultat du calcul de la courbe de remous dans le canal d’amenée du moulin de Roussel (Source : <http://hydraulique.g-eau.net>)

faut modifier les champs « Débit amont » et « Tirant d’eau imposé à l’aval » du formulaire de calcul de la courbe de remous pour obtenir un nouveau tirant d’eau amont à comparer avec le tirant d’eau amont cible. Si le tirant d’eau obtenu est inférieur, il faut choisir un débit supérieur et réciproquement.

La dichotomie est initialisée avec un débit de 0.6 m³/s que l’on sait déjà inférieur au débit cible et un débit de 1,4 m³/s comme débit supérieur.

Le tableau 6.1 résume les itérations de calcul.

TABLE 6.1 – Résultat des calculs itératifs de calcul du débit maximum dérivable du moulin de Roussel

Itération	Débit Q (m ³ /s)	Tirant d’eau amont seuil = aval canal d’amenée (m)	Tirant d’eau amont canal (m)
1	0.60	0.324	0.486
2	1.40	0.569	0.745
3	1.00	0.455	0.624
4	1.20	0.513	0.686
5	1.10	0.485	0.656
6	1.15	0.500	0.672

Cette modélisation prend en compte la section de contrôle située au niveau des vannes motrices et les pertes de charges présentes dans le canal d’amenée. Le débit maximum dérivable obtenu est de 1,15 m³/s.

6.1.4 Critique des différentes méthodes de calcul

La méthode de calcul du bureau d’étude basée sur la vitesse d’écoulement au niveau des vannes d’entrée du canal d’amenée n’est pas recevable car la vitesse choisie de 1 m/s ne repose sur aucun fondement.

L'administration a retenu le débit de 570 L/s mentionné dans l'état statistique de 1899. La consistance légale a ensuite été calculée à partir de ce débit et d'une hauteur de chute de 4,26 m. Cette dernière est calculée entre la cote du seuil de dérivation (394,66 m NGF) et la cote de restitution au cours d'eau (390,40 m). La consistance légale retenue par l'administration est de 23,8 kW et celle-ci n'a pas été contestée par le requérant.

La méthode appliquée par l'administration correspond donc à celle présentée au Chapitre 2.

La méthode par modélisation basée sur la topographie actuelle de l'installation donne un débit de 1,15 m³/s. La consistance légale, compte tenu d'une hauteur de chute brute de 4,26 m serait de 48,1 kW (Voir Formule 1.1 page 9).

Bien que l'installation se trouve visiblement aujourd'hui dans un état identique à celui constaté en 1899 et à l'état du moulin tel qu'il était sûrement à l'époque de la révolution, le calcul du débit par modélisation donne un résultat deux fois supérieur à celui des états statistiques de 1899.

Cet écart peut s'expliquer par l'hypothèse d'ouverture maximale des vannes motrices et aussi par le fait que le calcul ne prend pas en compte la hauteur limitée des coursiers présents à l'amont des roues que l'on peut apercevoir sur la Figure 6.2c page 50.

6.2 Moulin de Pont de Giret sur le Ger à Aspet (Haute-Garonne)

6.2.1 Description du site

Le moulin est alimenté à partir d'un seuil de dérivation (cote NGF 445,90 m) par un canal long de plus de 800 mètres (Figure 6.7). L'entrée de la dérivation est pourvue de 4 vannes. Le bief de dérivation est pourvu d'au moins 2 anciens moulins et d'une scierie en série. Le moulin faisant l'objet de la reconnaissance de DFT est celui situé le plus à l'aval. Un seuil de décharge (cote NGF 438,58 m) se trouve à l'amont immédiat du moulin qui rejette ses eaux dans un court canal de restitution qui se rejette dans le cours d'eau à la cote NGF 434,54 m.

6.2.2 Calcul de la consistance légale à partir de l'état statistique

Le moulin est mentionné dans un inventaire statistique des usines et prises d'eau datant de 1906 et il fait apparaître un droit d'eau de 600 L/s avec une chute de 2,90 m (Figure 6.8). La puissance brute de l'installation est exprimée en poncelet¹, on peut la recalculer à partir du débit et de la hauteur de chute et de l'équation 1.1 page 9 ou la convertir en kW, on obtient une valeur de 17 kW.

Si on retient le débit annoncé dans l'inventaire de 1906 (Figure 6.8) et une hauteur de chute brute de 11,36 m correspondant à la différence entre la cote du seuil de dérivation (445,90 m NGF) et la cote de l'eau à la restitution dans le Ger (434,54 m NGF), la consistance légale du moulin s'élèverait à :

$$P = 0.6 \times 11,36 \times 9,81 = 66,9 \text{ kW}$$

1. 1 poncelet = 0,981 kW (source : Wikipédia)

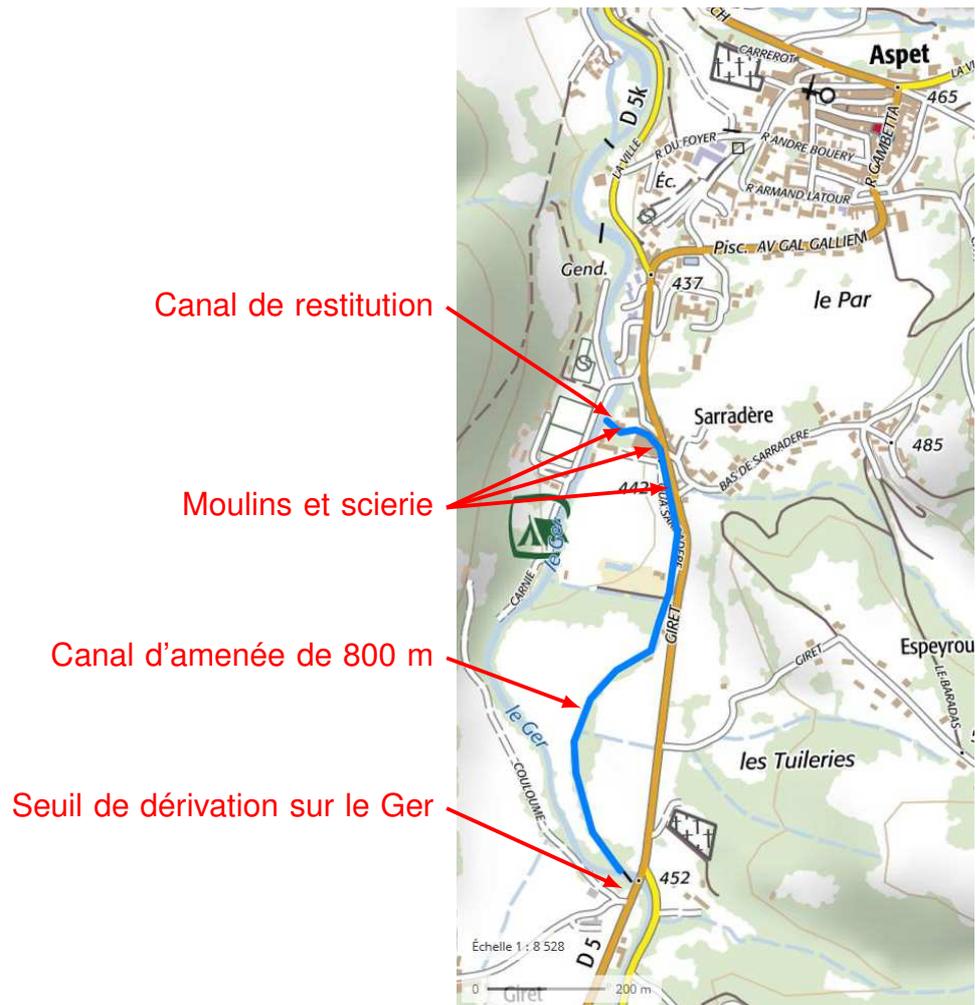


FIGURE 6.7 – Plan d'ensemble du site du moulin de Pont de Giret (Crédit : IGN)

Usines								
Nature	Désignation (nom de l'usine)	Nombre		Volume des eaux motrices	Chutes en eau ordin ^{res}	Force brute (en poncelets)	Nature du moteur hydraulique	Force utilisée (en poncelets)
		de pairs de meules des moulins						
Filature de laine.	L'atour			300	2.00	6	Rouet volant ou libre	1.50
Scierie à bois				400	2.00	8	Rouet volant (rodet)	2.50
Moulin à farine.		3		600	2.90	17.100	3 rouets libres ou volants	4.9

FIGURE 6.8 – Extrait de l'inventaire des usines et prises d'eau de 1906 où figure le moulin de Pont de Giret

6.2.3 Estimation du débit présente dans le dossier

Le demandeur a fourni une étude réalisée par un bureau d'étude qui propose de calculer le débit dérivé maximum à partir de la section mouillée au niveau des vannes d'entrée ($1,87 \text{ m}^2$) et d'une vitesse moyenne d'écoulement de 1 m/s , soit un débit maximum dérivable de $1,87 \text{ m}^3/\text{s}$.

Le bureau d'étude propose de calculer la consistance légale à partir de la différence entre la cote du seuil à l'amont immédiat du moulin et la cote de restitution, soit une chute brute de $4,04 \text{ m}$. La puissance maximale brute calculée à partir de l'équation 1.1 est alors de 74 kW .

L'administration a choisi de retenir la définition proposée dans l'arrêté du 11 septembre 2015 (Voir Section 1.3 page 9) en retenant un débit de $1,87 \text{ m}^3/\text{s}$ et en utilisant la hauteur de chute entre la cote du seuil de dérivation sur le cours d'eau et la cote de restitution soit une chute de $11,36 \text{ m}$. La puissance maximale brute est alors de 214 kW .

6.2.4 Critique des différents modes de calcul

Le bureau d'étude a calculé un débit à partir d'une section mouillée et d'une vitesse moyenne. Ce calcul n'a aucun fondement hydraulique. On ne peut donc pas retenir cette méthode pour évaluer le débit maximum dérivable.

Avec une longueur de plus de 800 m et un dénivelé de plus de 6 m entre le seuil de dérivation et le seuil à l'amont du moulin, dont une part est tout de même exploitée par les autres moulins en amont, il y a de fortes chances que le contrôle hydraulique se trouve dans le canal d'amenée.

Deux solutions s'offrent alors :

- Effectuer une mesure de débit in situ dans des conditions hydrologiques permettant d'avoir une cote de plan d'eau sur le seuil de dérivation égale à la cote normale de fonctionnement.
- Modéliser l'hydraulique du canal d'amenée.

Cette deuxième solution consiste alors à calculer des courbes de remous sur la partie amont du canal d'amenée en partant d'un contrôle hydraulique identifié à l'aval jusqu'à ce que le débit choisi pour le calcul de la courbe se raccorde avec la cote normale de fonctionnement (cf. Section 4.3.2). Pour se faire, il faut un minimum de données topographiques (un gabarit des sections, un profil en long sommaire et une description du substrat) qui sont absentes du dossier.

Concernant l'utilisation du débit annoncé dans l'état statistique, on a vu Section 2.4 page 17 que la jurisprudence n'est pas constante quant à l'utilisation de ces données de débit. On a cependant démontré Sections 1.4 et 2.4.2 qu'il y a tout lieu de considérer que le débit mesuré dans l'état statistique correspond au débit maximum que le moulin était autorisé à entonner dans le cadre de son droit d'eau. Dans le cas du moulin de Giret, le contrôle hydraulique qui va déterminer le débit maximum dérivable ne se situe pas au niveau du moulin mais au niveau du canal d'amenée, il est donc envisageable que le débit calculé à partir de la simulation hydraulique soit supérieur à celui de l'état statistique.

Étant donné que l'objectif de l'évaluation de la consistance légale est de maintenir la même pression sur l'écosystème situé au niveau du tronçon du cours d'eau court-circuité que celle existante lors de l'établissement du droit fondé en titre et qu'il est possible que le canal dérive plus d'eau que les 600 L/s mesurés dans l'état statistique, il n'y a pas d'intérêt écologique à empêcher le moulin d'utiliser la totalité du débit dérivé par le canal d'amenée. Cet argument peut peser dans le choix du débit à prendre en compte dans le calcul de la consistance légale.

Concernant la hauteur de chute, la position de l'administration consistant à retenir la chute totale entre le seuil de dérivation du cours d'eau et la restitution pose problème. La puissance calculée correspond à la puissance exploitable entre ces deux points, or le moulin de Pont de Giret n'est pas le seul moulin susceptible de demander une reconnaissance de DFT sur ce bief dérivé. Si le propriétaire d'un autre moulin effectue une demande de reconnaissance, il paraît incohérent de lui octroyer une consistance légale identique alors cette puissance doit être nécessairement partagée entre les différents ouvrages. Ici comme les ouvrages sont situés en série, la hauteur de chute devrait être partagée et il paraîtrait logique de prendre en compte comme cote normale de fonctionnement, la cote de la crête du déversoir de décharge situé à l'amont immédiat du moulin comme l'a fait le bureau d'étude chargé du calcul de la consistance légale.

6.3 Usine hydroélectrique de Bourguignon sur le Doubs à Bourguignon (Doubs)

Ce cas d'étude est relativement complexe et a fait l'objet d'un lourd contentieux. Les nombreux documents disponibles permettent d'évaluer les trois méthodes de calcul du débit maximum dérivable.

6.3.1 Présentation du cas d'étude

La Figure 6.9 représente une photographie aérienne du site qui comprend :

- un seuil de dérivation de 126 m de large, une crête à la cote NGF 342,87 m et des rehausses en bois amenant la crête à la cote NGF 343,31 m (Figure 6.10a) ;

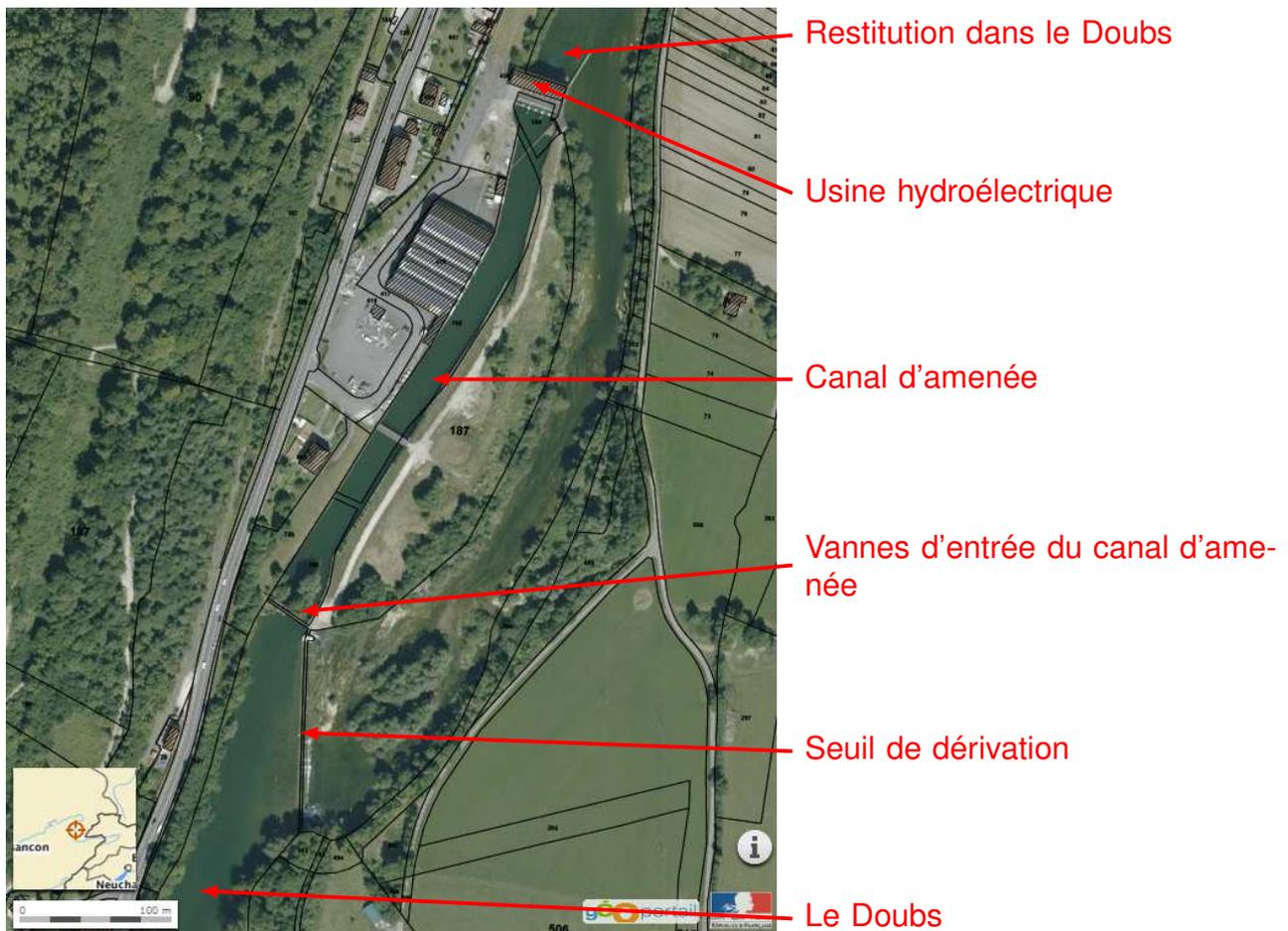


FIGURE 6.9 – Plan d'ensemble du site de l'usine Bourguignon (Crédit : IGN)

- 7 vannes avec un radier à la cote NGF 341,36 m regroupées sur 3 pertuis à l'entrée du canal d'amenée totalisant une largeur de 17,40 m (Figure 6.10b) ;
- d'un canal d'amené de 385 m de long (largeur moyenne 23 m) composé à l'amont de deux biefs se rejoignant au bout de 35 m ;
- d'une usine hydroélectrique comportant 3 vannes motrices de 8 m de large et équipée de 4 turbines ayant chacune une capacité nominale de 15,2 m³/s soit un total de 60,8 m³/s (Figure 6.10c) ;
- la restitution au cours d'eau est estimée à la cote NGF 339,07 m.

La Jurisprudence concernant ce site est disponible dans la base de jurisprudence du Conseil d'État² et sur legifrance :

- jugement n°271736 rendu par le Conseil d'État le 21 mai 2008 (litige avec la société d'exploitation électrique de Mathay) ;
- jugement n°14NC01822 rendu par la cours d'appel administrative de Nancy le 2 juillet 2015 ;
- jugement n°393293 rendu par le Conseil d'État le 16 décembre 2016.

2. <http://www.conseil-etat.fr/Decisions-Avis-Publications/Decisions/ArianeWeb>



(a) Seuil de dérivation



(b) Vannes d'entrée du canal d'amenée



(c) Usine hydroélectrique

FIGURE 6.10 – Photos du site de l'usine Bourguignon (Crédit : David Dorchies, Irstea)

6.3.2 Données historiques

L'usine est reconnue fondée en titre car autorisée à utiliser la force motrice de l'eau depuis 1634 et a été vendue comme bien national en 1797. Une annonce publique de 1851 décrit les roues hydrauliques de l'installation totalisant une puissance de 245 chevaux, soit 180 kW³.

Un règlement d'eau datant de 1854 fait état des cotes du seuil et des dimensions des vannes du canal d'amenée qui sont conformes à la situation actuelle. Ce règlement d'eau fait suite à une plainte déposée en 1844 d'un autre usager du Doubs situé à l'amont se plaignant d'un « exhaussement du barrage ». Il fixe la cote du barrage à la cote observée aujourd'hui et il n'y est fait nulle mention des rehausses.

L'administration retient la cote du barrage fixée dans le décret de 1854 comme cote normale de fonctionnement. Ce point a été contesté par le pétitionnaire, celui-ci se base sur le fait que les rehausses ne sont pas mentionnées dans le décret et qu'un courrier du Ministère

3. Pour la conversion voir l'Equation 10.1 page 85

de l'Agriculture datant du 14 février 1860 fait état de l'existence de ces réhausses « depuis des temps immémoriaux ».

L'usine actuelle date de 1920. Avant cette date l'usine était située plus à l'amont du canal comme le souligne un arrêté préfectoral du 4 août 1920. Ce déménagement a en théorie été réalisé « considérant que la modification demandée n'apporte aucun changement dans le régime des eaux, soit en amont, soit en aval du barrage et qu'il s'agit simplement d'une translation de l'usine sur les terrains des pétitionnaires, en vue de mieux utiliser une chute réglementée antérieurement ».

Le jugement n°271736 rendu par le Conseil d'État le 21 mai 2008 opposant la société SJS exploitant l'usine de Bourguignon à la société d'exploitation électrique de Mathay fait apparaître un droit fondé en titre de 180 kW mais aussi « qu'il n'est pas sérieusement contesté que sa puissance est de 900 KW ».

6.3.3 Calculs du débit maximum dérivable versés au dossier

Le requérant a fait réaliser une étude hydraulique où deux méthodes sont utilisées pour calculer le débit maximum dérivable. Ces deux méthodes prennent en compte les réhausses dans le calcul du débit dérivé (cote NGF 343,31 m).

6.3.3.1 Méthode de Manning Strickler

La première méthode utilise la formule de Manning Strickler sur chacun des 3 pertuis formant les vannages. Les données utilisées sont les dimensions des pertuis, la hauteur d'eau calculée à partir de la cote des rehausses et du radier des vannes, un coefficient de Strickler d'environ 45 et une pente de l'eau de un pour mille. Cette méthode permet de trouver un débit de 63,6 m³/s soit une consistance légale de 2777 kW.

Critique Aucune information ne permet d'affirmer que la pente de l'eau devrait être de un pour mille à cet endroit lorsque le débit est maximal. De plus, rien ne prouve a priori que la section de contrôle se trouve au niveau des pertuis d'entrée. Ce résultat est donc difficilement justifiable.

6.3.3.2 Méthode de la vitesse limite

La deuxième méthode consiste à considérer la vitesse d'écoulement maximale avant érosion du fond du canal. Elle se base sur les données fournies par un manuel d'hydraulique appliquée (RIBAUX, 1967) et retiennent, étant donné le substrat présent, une vitesse limite d'écoulement avant érosion 2,30 m/s. Cette vitesse multipliée par la section d'écoulement au niveau des vannes d'entrée du canal d'amenée donne un débit maximum dérivable de 69,2 m³/s soit une consistance légale de 3022 kW.

Critique Ici encore, la méthode de la vitesse limite part du postulat non justifié que la section de contrôle se situe au niveau des pertuis d'entrée du canal d'amenée. Ce qui est illogique car, en imaginant que l'exploitant contrôle le débit pour ne pas endommager le canal d'amenée, il le fera grâce à l'usine ce qui montre bien que, dans tous les cas, la section de contrôle se situe au niveau de l'usine. Or, il est versé au dossier que l'usine a été

déménagée en 1920. **Toute modélisation à partir des installations actuelles ne pourra représenter le débit présent à l'origine du droit fondé en titre.**

6.3.3.3 Mesures de débits in situ

L'administration a procédé à plusieurs mesures de débit avec les turbines en fonctionnement avec un débit maximum mesuré de 42,2 m³/s. Sur cette base l'administration propose une consistance légale de 1345 kW. Ces mesures n'ont pas été reconnues par le propriétaire car, selon lui, seules trois turbines sur quatre étaient en fonctionnement le jour de la mesure.

Dans le cas présent, le propriétaire considère de manière radicale que pour évaluer le débit maximum dérivable, il ne faudrait pas prendre en compte le contrôle hydraulique que pourrait constituer l'usine et donc que toute mesure de débit, même avec les 4 turbines en fonctionnement, ne pourrait pas être prise en compte.

Critique La mesure de débit pour l'estimation du débit maximum dérivable n'est utilisable qu'à condition que l'usine soit dans sa configuration d'origine ou que le contrôle hydraulique se situe à l'amont de celle-ci. Aucune de ces deux conditions n'étant remplie, une mesure de débit in situ ne pourra pas représenter le débit du droit fondé en titre.

6.3.4 Évaluation du calcul dérivable à partir des données historiques

A partir de la puissance nette publiée dans l'annonce publique de 1851, il est possible d'évaluer une puissance brute et le débit maximum dérivable correspondant selon la méthode exposée au chapitre 2 page 14.

La puissance nette annoncée était de 180 kW. La hauteur de chute maximum actuelle est de l'ordre de 4 mètres. L'usine ayant été déménagée vers l'aval en 1920 pour exploiter une chute plus importante, on sait déjà que la hauteur de chute nette pouvait être bien inférieure à cette valeur. Étant donné la configuration des lieux, on peut tout de même estimer qu'une hauteur de chute exploitée de 2 mètres devait être un minimum.

Aucun détail n'est fourni sur la nature des roues utilisées à l'époque. Afin de maximiser la puissance brute, on prendra une valeur de rendement minimale qui peut difficilement être inférieure à 20 %.

Compte tenu de ces hypothèses qui maximisent le débit maximum dérivable, en utilisant l'Équation 2.2 page 17, on obtient :

$$Q_{derive} = \frac{P_{nette}}{h_{nette} \times 9.81 \times R_{total}} = \frac{180}{2 \times 9.81 \times 0.2} = 46 \text{ m}^3/\text{s}$$

Critique La valeur obtenue ici ne peut être qu'indicative étant donné les incertitudes qui entourent les hypothèses faites sur la hauteur de chute nette et le rendement des installations d'origine. Étant donné les précautions prises sur ces hypothèses, cette valeur est tout de même censée refléter une valeur maximale du débit maximum dérivable.

6.3.5 Jugement du Conseil d'État

Le mémoire du rapporteur contient plusieurs points discutables.

La cour retient le calcul du débit maximum dérivable basé sur la vitesse limite a défaut de mieux (« nous ne voyons pas de raison de censurer la cour qui a retenu l'évaluation théorique de la société SJS faute d'éléments convaincants »).

Elle retient donc le postulat que la section de contrôle se situe au niveau des pertuis d'entrée du canal d'aménée. Elle considère notamment que le débit d'équipement de 61 m³/s est un débit minimal car le débit maximal de la dérivation est « nécessairement supérieur au volume turbiné du fait des pertes de rendement dû à l'usine. » Ce raisonnement est inexact car les pertes de rendements de l'usine vont limiter la puissance nette exploitable (voir la définition de la puissance nette Section 2.2 p. 14) mais rien ne permet d'affirmer que le débit dérivé serait impacté par le rendement des turbines.

La cour part aussi du postulat que la configuration actuelle de l'usine est la même que celle déterminant le droit fondé en titre. Ce point se retrouve dans deux passages :

mais surtout, il faut garder à l'esprit que l'exploitant de l'usine ayant une existence légale est fondé à retirer de la chute d'eau toute la puissance qu'elle est en mesure de délivrer, tant qu'il ne modifie pas les caractères de l'ouvrage.

Nous ne voyons guère de raison de faire durer un litige (...) dès lors que, comme nous l'avons dit, il est acquis que l'ouvrage n'a pas été modifié depuis la reconnaissance de son existence légale.

Or, le dossier contient bien l'information du déménagement de l'usine en 1920, l'affirmation que l'ouvrage n'a pas été modifié est donc fausse.

Dans son fonctionnement actuel, toutes les parties reconnaissent que le débit dérivé est contrôlé par l'usine. Avant déménagement de l'usine, le canal d'aménée était plus court, on peut donc affirmer que la section de contrôle devait alors aussi se situer au niveau de l'usine.

Pour effectuer une évaluation de débit maximum dérivable par modélisation, il faudrait prendre en compte les cotes de l'usine avant son déménagement en 1920. Le règlement d'eau de 1854 fait état de l'existence de plans annexés au règlement, il aurait donc été possible avec ces documents, de proposer une modélisation du débit maximum dérivable dans les conditions du droit fondé en titre.

6.4 Moulin de Sienne sur la Sienne à Percy (Manche)

6.4.1 Présentation du cas d'étude

6.4.1.1 Introduction

Le moulin de Sienne sur la commune de Percy dans le département de la Manche a fait l'objet d'un contentieux à la cour d'appel administrative de Caen (Affaire n°16NT00250).

Le dossier contient des plans réalisés en 1928 avant transformation de l'usine pour installation de turbines. En l'absence d'autres éléments, on peut estimer que ces plans sont représentatifs de la géométrie de l'installation existante lors de l'établissement du droit fondé en titre en 1789. De plus, ces plans sont suffisamment détaillés pour pouvoir effectuer une estimation du débit dérivé par modélisation mais celle-ci se révèle particulièrement complexe du fait du fonctionnement hydraulique de l'installation.

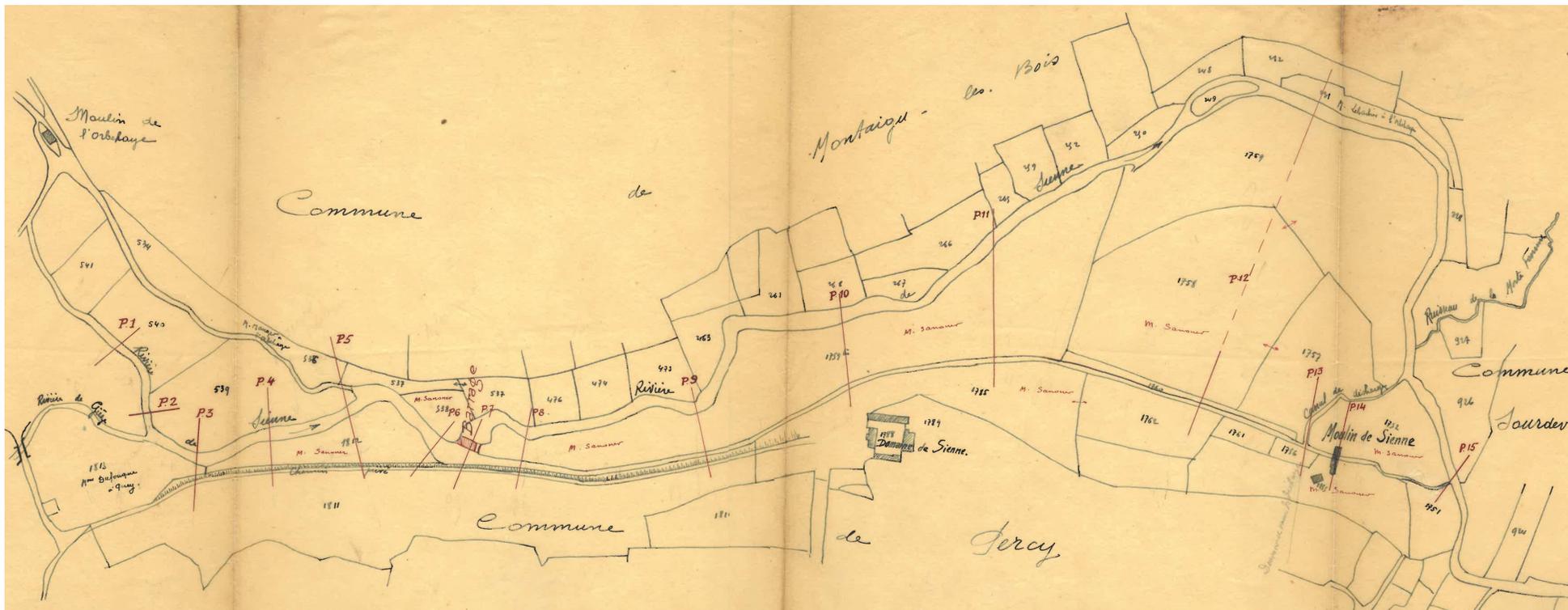


FIGURE 6.11 – Plan de situation

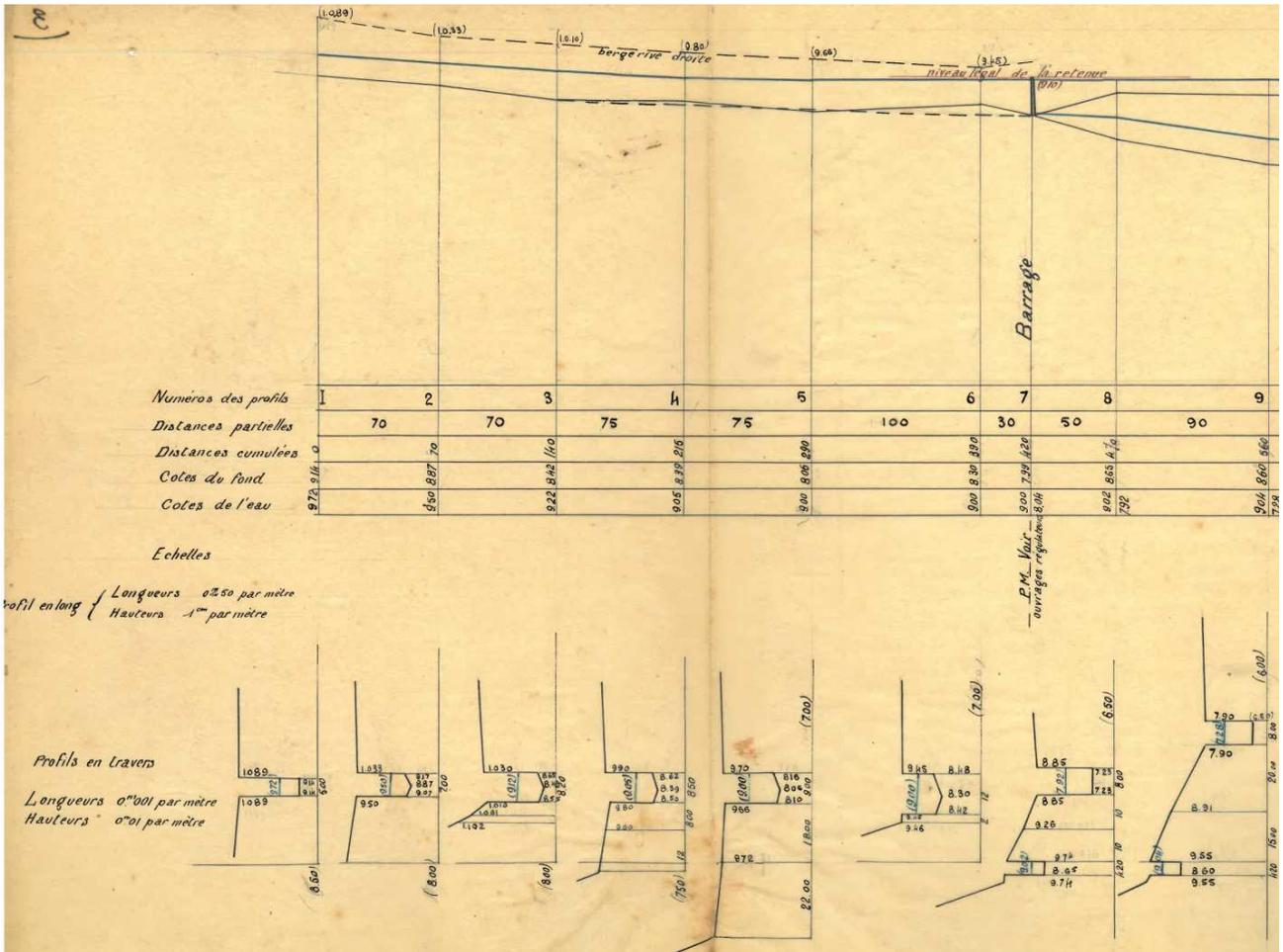


FIGURE 6.12 – Profils du canal d’amenée (partie amont)

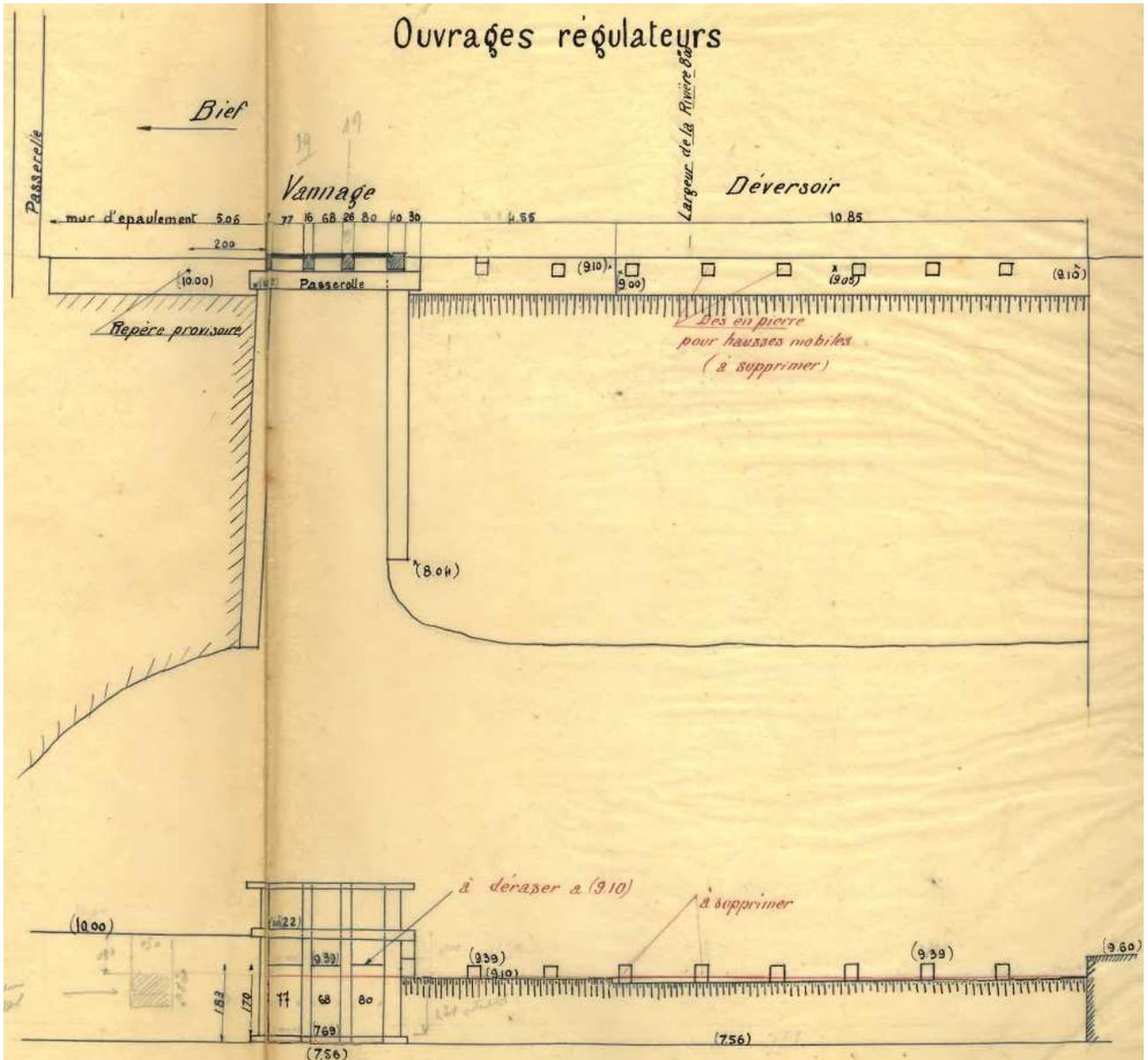


FIGURE 6.14 – Plan des ouvrages régulateurs

6.4.1.2 Topologie de l'installation

Sur les plans de 1928, le moulin de Sienne est composé de plusieurs éléments (Voir plan de situation Figure 6.11 page 64) :

- Un barrage de dérivation sur la Sienne ;
- Un canal d'amenée rectangulaire de 770 m de long et de 4,20 m de large (Voir profil en long du canal Figures 6.12 et 6.13 pages 65 et 66) ;
- Un seuil de décharge à la cote 8,90 m dans le référentiel du plan (Voir plan des ouvrages moteurs et du déversoir de décharge Figure 6.15 page 68) situé 30 mètres à l'amont de l'usine ;
- Une usine composée d'un premier vannage de régulation (voir plan des ouvrages régulateurs Figure 6.14 page 67) puis de vannes motrices situées à l'amont immédiat des roues (Figure 6.15 page 68) ;
- Un canal de décharge à l'aval du déversoir de décharge et un canal de restitution à l'aval de l'usine.

6.4.1.3 Fonctionnement hydraulique général

Le débit qui nous intéresse est celui qui traverse les vannes motrices de l'usine quand le niveau d'eau au barrage de dérivation de la Sienne est égal au niveau légal de la retenue soit à la cote 9,10 m (① du profil en long Figure 6.16). Or le débit des vannes motrices (④ Figure 6.16) dépend du niveau d'eau à l'amont immédiat des vannes motrices. Ce niveau d'eau dépend des pertes de charges qui vont se produire dans le canal d'amenée entre le barrage de dérivation et l'usine (② Figure 6.16). Ces pertes de charge vont elles-même dépendre du débit transitant dans le canal d'amenée, et ce débit est la somme du débit passant par le déversoir de décharge (③ Figure 6.16) et les vannes motrices de l'usine.

Des vannes servant pour la régulation du débit utilisé par l'usine sont présentes à l'amont immédiat des orifices des vannes motrices (cf. Figure 6.14 page 67). On considèrera le cas où ces vannes de régulation sont complètement ouvertes et on négligera les éventuelles pertes de charges (et donc la baisse éventuelle du niveau d'eau) entre le plan d'eau de l'usine et les orifices des vannes motrices provoquées par ces vannes. En effet, étant donné le rapport de taille entre les vannes de régulation et les vannes motrices, on peut s'attendre à ce que ces pertes de charges soient infimes. Cette hypothèse sera vérifiée au Chapitre 6.4.2.2 une fois que l'on connaîtra le débit maximal pouvant transiter par les vannes motrices.

6.4.2 Application de la méthodologie de calcul du débit dérivé par modélisation

6.4.2.1 Recherche de la ou des sections de contrôle hydraulique

Pour rappel, la section de contrôle hydraulique est une section où les conditions hydrauliques permettent d'établir une relation directe entre le niveau de l'eau et le débit passant à travers la section. Ces conditions se retrouvent dans le cas d'un déversoir ou d'un orifice dénoyé (c'est-à-dire un déversoir pourvu d'une chute d'eau à l'aval ou un orifice où le jet à l'aval est à l'air libre, non noyé sous le niveau d'eau aval) ou encore dans le cas particulier d'un canal aux caractéristiques homogènes ayant une longueur et une pente suffisante pour que le niveau d'eau ne soit plus influencé par les obstacles et perturbations présents à l'aval.

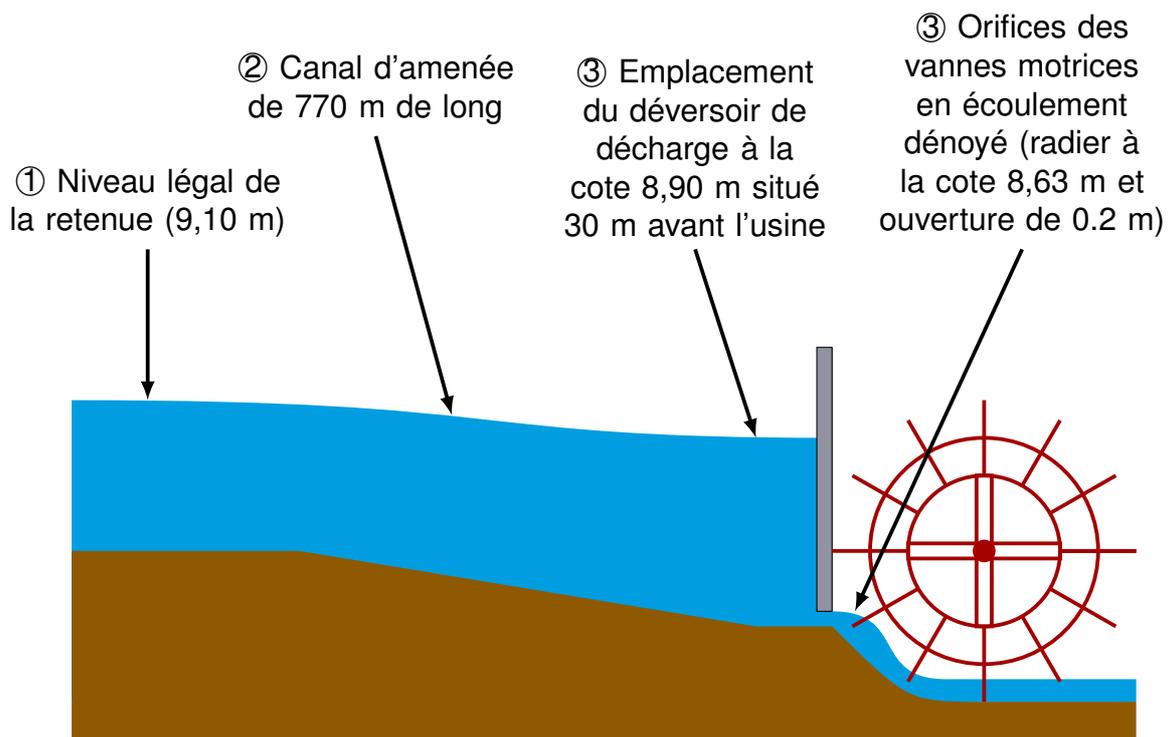


FIGURE 6.16 – Profil en long descriptif du moulin de Sienne

Cette relation directe permet d'initier les calculs qui permettront de déterminer finalement le débit transitant par les vannes motrices de l'usine.

Sur cette installation, on trouve deux sections de contrôle :

1. Les vannes motrices de l'usine où les petits orifices produisent un jet dénoyé qui vient frapper les aubes des roues ;
2. Le déversoir de décharge qui déverse librement dans le canal de décharge.

On peut donc pour chacun de ces ouvrages calculer le débit transitant dans chacun d'eux à condition de connaître le niveau d'eau du plan d'eau à l'amont de l'usine.

Si on analyse les différents éléments de l'installation :

- les dimensions du canal (4,20 m de large sur une profondeur allant de 40 à 80 cm, soit une surface hydraulique allant de 1,7 à 3,4 m²) ;
- la dimension des orifices des vannes motrices (Largeur totale 1,26 m pour une hauteur de 20 cm, soit une surface hydraulique de 0,25 m²) ;
- la cote de la crête du déversoir de décharge (8,90 m) ;
- la différence de cote entre le niveau légal de la retenue (9,10 m) et celui des orifices de la vannes motrice (base de l'orifice à la cote 8,67 m).

On peut a priori estimer que le canal d'amenée avec sa surface hydraulique très importante au regard de celle des orifices des vannes motrices va drainer plus d'eau que nécessaire pour l'usine. Le surplus d'eau va donc s'échapper par le déversoir de décharge et la cote de l'eau du plan d'eau de l'usine se situerait donc quelque part entre 8,90 m et 9,10 m.

6.4.2.2 Calcul des débits possibles des orifices des vannes motrices

Calcul par un orifice dénoyé Pour calculer le débit passant par les orifices des vannes motrices, on utilise la formule pour orifice ou ajutage dénoyé suivante (CARLIER, 1972) :

$$Q = C_d S \sqrt{2gH} \quad (6.1)$$

Avec :

- Q le débit en m^3/s ;
- C_d le coefficient de débit ;
- S la surface de l'orifice en m^2 ;
- g l'accélération de la pesanteur terrestre égale à $9,81 \text{ m/s}^2$;
- H la hauteur d'eau mesurée entre la surface de l'eau et le centre de l'orifice en mètres (Voir Figure 6.17).

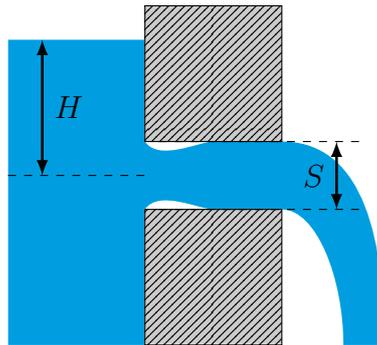


FIGURE 6.17 – Schéma d'un ajutage du type du moulin de Sienne

Pour un ajutage long comme celui du moulin de Sienne, le coefficient C_d sera de l'ordre de 0,8 (cf. [CARLIER, 1972](#)). La cote du milieu de l'orifice est égale à $(8,83 + 8,63) / 2 = 8,73 \text{ m}$.

Nous pouvons donc calculer les débits susceptibles de s'écouler par les orifices des vannes motrices pour une cote amont comprise entre 8,90 m et 9,10 m avec :

- $C_d = 0,8$;
- $S = (0,29 + 0,35 + 0,35 + 0,27) \times 0,2 = 0,252 \text{ m}^2$;
- H compris entre $H = 8,90 - 8,73 = 0,17 \text{ m}$ et $H = 9,10 - 8,73 = 0,37 \text{ m}$.

Le résultat du calcul (Figure 6.18 page 72) donne un débit compris entre 370 L/s et 542 L/s en fonction du niveau d'eau du plan d'eau de l'usine.

Vérification de l'hypothèse de non prise en compte du vannage régulateur A partir du débit maximum des orifices des vannes motrices, on peut calculer la perte de charge maximale au niveau des vannes des ouvrages régulateurs et vérifier que l'on peut effectivement les négliger dans le calcul global.

Le vannage sera considéré comme entièrement ouvert, les pelles de vannes ne touchant pas la surface de l'eau. Dans ce cas, on utilisera une équation de déversoir noyé pour effectuer le calcul ([BAUME, BELAUD et VION, 2013](#)) :

$$Q = C'_d \sqrt{2gL} h_{aval} \sqrt{h_{amont} - h_{aval}} \quad (6.2)$$

Avec :

- Q le débit en m^3/s ;
- C'_d le coefficient de débit qui, dans le cas noyé, est proche de 1 ;

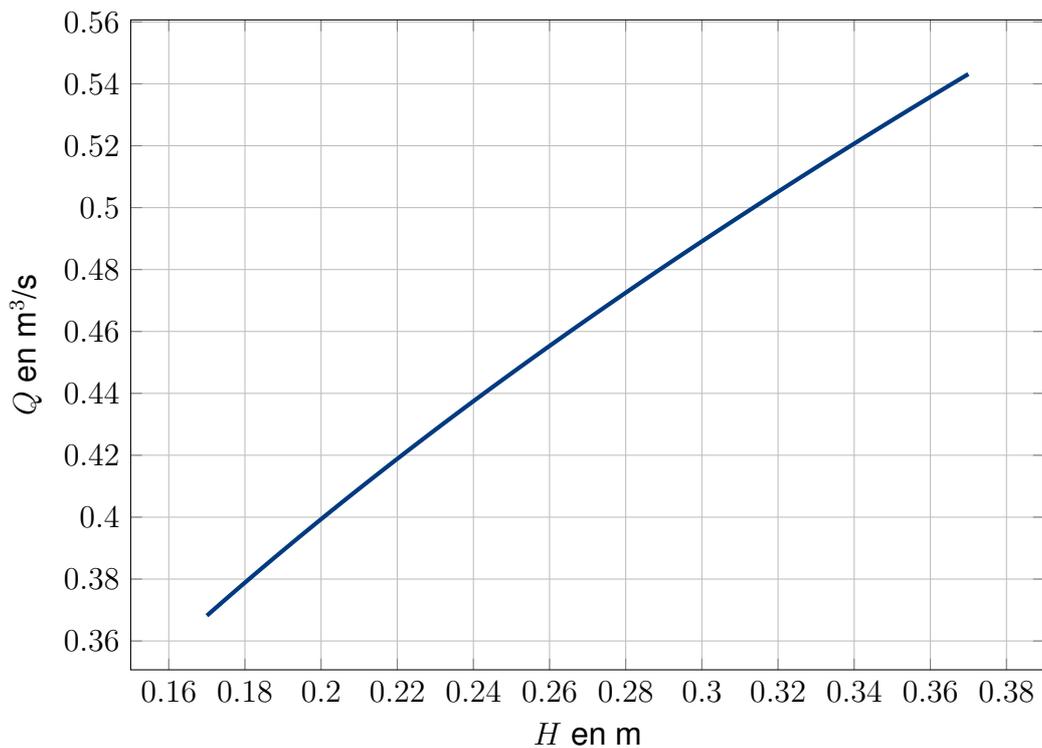


FIGURE 6.18 – Calcul du débit des orifices des vannes motrices en fonction de la hauteur d'eau mesurée entre la surface de l'eau et le centre de l'orifice

- g l'accélération de la pesanteur terrestre égale à $9,81 \text{ m/s}^2$;
- L la largeur du déversoir ;
- h_{amont} la hauteur d'eau à l'amont au dessus du radier de la vanne en mètres.
- h_{aval} la hauteur d'eau à l'aval au dessus du radier de la vanne en mètres.

Le radier du vannage se situe à la cote 7,69 m. Dans le cas du débit maximal $Q = 0.542 \text{ m}^3/\text{s}$ pour une cote de l'eau du plan d'eau de l'usine à 9,10 m, on aura $h_{amont} = 9,10 - 7,69 = 1,41 \text{ m}$.

L'équation 6.2 ne permet cependant pas de calculer directement h_{aval} en fonction des autres paramètres de l'équation. On peut procéder par dichotomie ou essai-erreur afin de retrouver le débit recherché.

TABLE 6.2 – Résultat des itérations de calcul de la perte de charge du vannage des ouvrages régulateurs de l'usine

Itération	h_{aval} (m)	Q (m^3/s)	Perte de charge (m)
1	1,40	1,395	0.01
2	1.408	0.628	0.002
3	1.409	0.444	0.001
4	1.4095	0.544	0.0015

Le résultat du calcul de la perte de charge pour le débit maximal est de 1,5 mm (Voir Table 6.2. Une si faible perte de charge nous permet de vérifier l'hypothèse faite au Paragraphe 6.4.1.3 consistant à négliger l'effet du vannage des ouvrages de régulation dans le calcul global.

6.4.2.3 Adaptation de la méthode de calcul du débit pour le cas du moulin de la Sienne

Avec la configuration de l'installation (long canal d'amenée et écoulement très contraint au niveau des vannes motrices de l'usine), on se retrouve a priori dans la configuration où le débit est à la fois contrôlé par les vannes motrices et les pertes de charge du canal d'amenée.

La méthode de calcul à appliquer consiste à calculer la ligne d'eau entre la section de contrôle hydraulique (ici, les orifices des vannes motrices) et le barrage à l'entrée du canal d'amenée et de trouver le débit permettant de raccorder cette ligne d'eau à la cote du niveau légal de la retenue.

Il faut donc procéder par itérations successives à partir d'un débit choisi arbitrairement et procéder aux étapes suivantes :

- ① Calculer la cote de l'eau à l'amont des orifices ;
- ② Calculer la ligne d'eau entre l'amont des orifices et le barrage ;
- ③ Comparer la hauteur d'eau obtenue avec la cote légale et réitérer à l'étape ① en choisissant un débit plus faible (resp. plus fort) si la cote obtenue est trop haute (resp. trop basse).

Cependant, si la cote du plan d'eau de l'usine dépasse 8,90 m, le débit transitant dans le canal d'amenée n'est pas le débit de l'usine mais la somme des débits de l'usine et du déversoir de décharge. Il n'est donc pas possible de choisir un débit et de calculer la cote à l'amont des orifices car on ne sait pas a priori comment se distribue le débit entre l'usine et le déversoir de décharge.

Il faut donc procéder autrement : au lieu de prendre le débit de l'usine comme point de départ du calcul, on prend la cote du plan d'eau de l'usine et on calcule les débits sortants par l'usine et le déversoir de décharge à partir de celle-ci. Pour simplifier le problème, on va considérer que le déversoir de décharge et l'usine se trouvent au même endroit et négliger les pertes de charges sur les derniers 30 m du canal d'amenée.

Le calcul débute donc par le choix d'une cote de l'eau pour le plan d'eau de l'usine et les étapes de calcul sont modifiées comme suit :

- ① Calculer le débit passant par les orifices pour la cote de plan d'eau choisie ;
- ② Calculer le débit passant par le déversoir de décharge pour la cote de plan d'eau choisie ;
- ③ Calculer la ligne d'eau entre le déversoir de décharge et le barrage à partir de la cote de plan d'eau choisie et en utilisant la somme des débits obtenue en étapes ① et ②
- ④ Comparer la hauteur d'eau obtenue avec la cote légale et réitérer à l'étape ① en choisissant une cote de plan d'eau plus basse (resp. plus élevée) si la cote obtenue est trop haute (resp. trop basse).

Une fois obtenue une cote à l'amont du canal suffisamment proche de la cote légale, le débit à retenir pour l'usine est le débit calculé à l'étape ①.

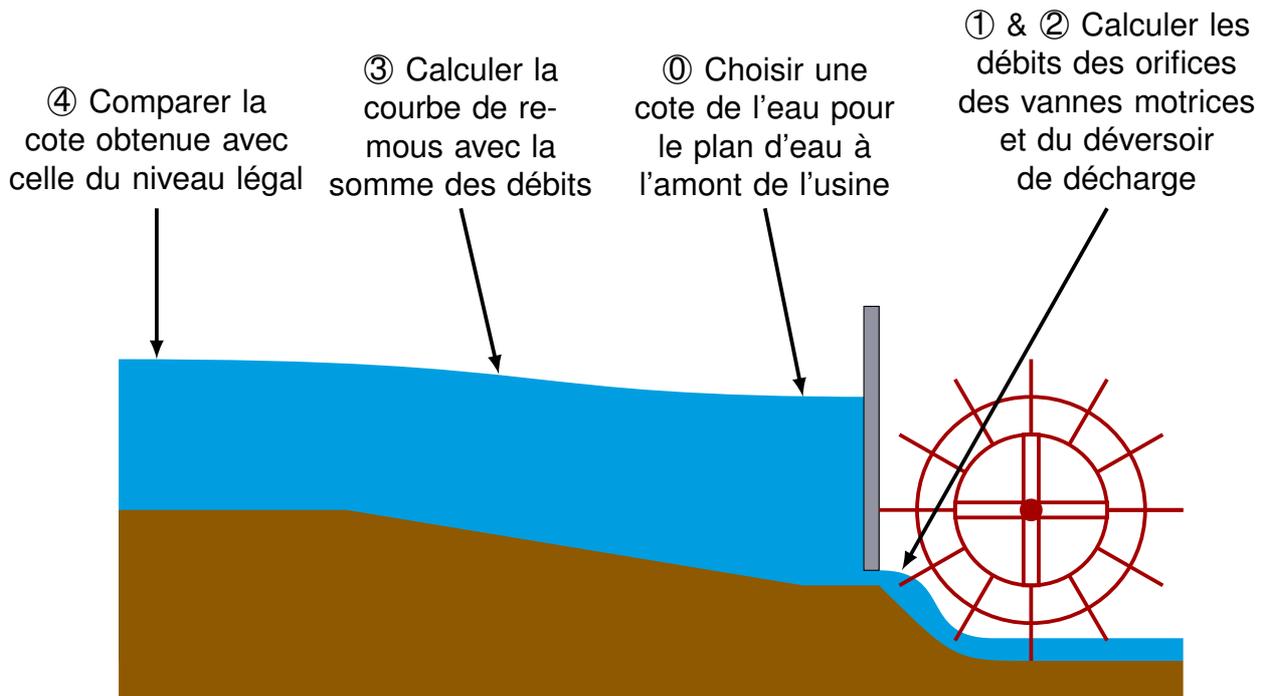


FIGURE 6.19 – Schéma des étapes de calcul du débit

6.4.2.4 Calcul du débit de l'usine

6.4.3 Formule de calcul du déversoir de décharge

La formule à utiliser sur le déversoir de décharge est la suivante (BAUME, BELAUD et VION, 2013) :

$$Q = C_d \sqrt{2g} L h_{amont}^{3/2} \quad (6.3)$$

Avec :

- Q le débit en m^3/s ;
- C_d le coefficient de débit, pour un déversoir à crête mince, on a $C_d = 0,4$;
- g l'accélération de la pesanteur terrestre égale à $9,81 \text{ m/s}^2$;
- L la largeur du déversoir ;
- h_{amont} la hauteur d'eau à l'amont au dessus de la crête du déversoir en mètres.

Le plan Figure 6.15 page 68, nous donne :

- $L = 3,15 \text{ m}$;
- $h_{amont} = Z_{usine} - 8,90$ avec Z_{usine} la cote de l'eau choisie pour le plan d'eau à l'amont de l'usine.

Calcul de la ligne d'eau du canal d'amenée Le canal d'amenée a les caractéristiques suivantes :

- Longueur : 740 m (770 m moins les 30 derniers mètres entre le déversoir de décharge et l'usine) ;
- Géométrie : rectangulaire de largeur 4,20 m ;

- Pente moyenne : 0,7 pour mille = $(8,65 - 8,14) / 740$;
- Rugosité : on fait l'hypothèse avantageuse d'un canal en terre bien entretenu avec des murs maçonnés soit un Strickler de 50.

Le calcul de la courbe de remous entre le déversoir de décharge et l'amont du canal d'amenée est réalisé avec l'outil disponible en ligne à cette adresse :

<http://hydraulique.g-eau.net/Courbes-de-remous>

Il faut y saisir les différentes caractéristiques du bief et de la géométrie de la section décrits ci-dessus ainsi que des conditions aux limites. Les conditions aux limites sont :

- Le débit transitant dans le canal qui sera la somme des débits du déversoir de décharge et de l'usine calculés à partir de la cote de l'eau choisie pour le plan d'eau ;
- Le tirant d'eau imposé à l'aval qui est égal à la cote de l'eau choisie moins la cote du fond au niveau du déversoir (8,14 m) ;
- Le tirant d'eau amont qui permet de calculer une ligne d'eau en écoulement torrentiel depuis l'amont. Comme ce n'est pas le cas ici, on rentre une valeur suffisamment haute pour qu'il n'y ait pas de ligne d'eau torrentielle calculée depuis l'amont (par exemple, un tirant d'eau supérieur ou égal au niveau légal de la retenue $(9,10 - 8,65 = 0,45 \text{ m})$).

Testons la méthode calcul pour une cote de plan d'eau à l'amont de l'usine de 9,00 m.

D'après l'équation 6.3, le débit du déversoir de décharge sera de :

$$Q_{\text{deversoir}} = 0,4 \sqrt{2 \times 9,81} \times 3,15 \times (9,00 - 8,90)^{3/2} = 0,176 \text{ m}^3/\text{s}$$

D'après l'équation 6.1, le débit de l'usine sera de :

$$Q_{\text{usine}} = 0,8 \times 0,252 \times \sqrt{2 \times 9,81 \times (9,00 - 8,73)} = 0,464 \text{ m}^3/\text{s}$$

Le débit total transitant par le canal pour une cote de 9,00 m du plan d'eau de l'usine est donc de :

$$Q_{\text{canal}} = 0,176 + 0,464 = 640 \text{ m}^3/\text{s}$$

Le tirant d'eau aval sera égal à $9,00 - 8,14 = 0,86 \text{ m}$ (8,14 m étant la cote du fond du canal au niveau du déversoir de décharge).

La Figure 6.20 est une copie d'écran du formulaire de l'outil de calcul de la courbe de remous du canal telle qu'elle devrait être remplie pour effectuer ce calcul. La figure 6.21 reproduit le graphique de résultat du calcul.

L'outil fournit le tableau des tirants d'eau de la ligne d'eau fluviale calculée depuis l'aval. La valeur fournie à l'abscisse 0 m correspond au tirant d'eau calculé au niveau du barrage de dérivation à l'entrée du canal. C'est cette valeur qu'il faut comparer avec le niveau légal de la retenue.

Le tirant d'eau correspondant au niveau légal est égal à $9,10 - 8,65 = 0,45 \text{ m}$. Le calcul avec une cote de plan d'eau de l'usine à 9,00 m renvoie un tirant d'eau à l'amont du canal d'amenée de 0,37 m. Conformément à l'étape ④ de la méthode décrite au Paragraphe 6.4.2.3 page 73, il faut choisir une cote de plan d'eau d'usine plus élevée pour raccorder la ligne d'eau au niveau légal de la retenue.

Calcul d'une courbe de remous par la méthode des trapèzes, de Runge Kutta ou d'Euler

Type de section	
Choix du type de section	Rectangulaire
Définition de la section rectangulaire	
Largeur au fond (m)	4.2
Caractéristiques du bief	
Coefficient de Strickler ($m^{1/3}s^{-1}$)	50
Longueur du bief (m)	740
Pente du fond (m/m)	0.0007
Hauteur de berge (m)	2
Conditions aux limites	
Débit amont (m^3/s)	0.454
Tirant d'eau imposé à l'aval (m)	0.86
Tirant d'eau imposé à l'amont (m)	0.45
Paramètres de calcul	
Pas de discrétisation (m)	5
Précision de calcul et d'affichage des cotes (m)	0.001
Méthode de résolution	Intégration par trapèzes
Donnée à calculer	
Choix de la donnée à calculer	Aucune
<input type="button" value="Calculer"/>	

FIGURE 6.20 – Formulaire de calcul de la courbe de remous du canal d'amenée pour une cote de plan d'eau de l'usine de 9,00 m

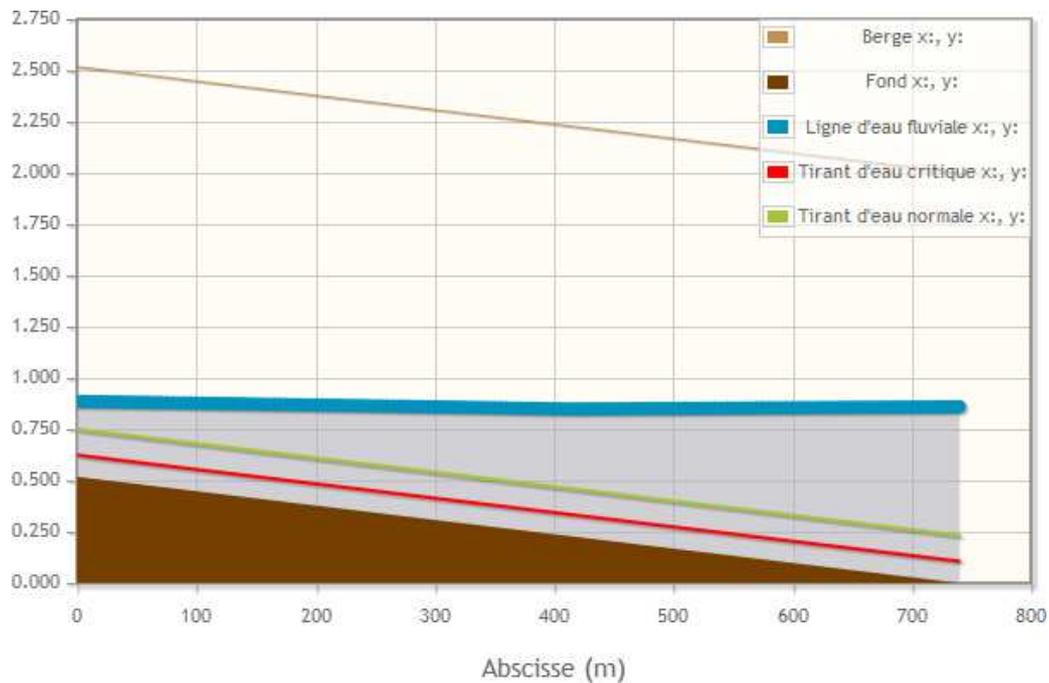


FIGURE 6.21 – Graphique du résultat du calcul de la courbe de remous du canal d'amenée pour une cote de plan d'eau de l'usine de 9,00 m

Calcul du raccordement des lignes d'eau entre l'amont du canal d'amenée et le niveau légal Le calcul du raccordement s'effectue pas itérations successives en répétant le calcul effectué au Paragraphe 6.4.3. Le résultat des itérations est résumé dans la Table 6.3 avec en colonnes :

- Z_{usine} : la cote de l'eau choisie pour le plan d'eau à l'amont de l'usine ;
- Y_{aval} : le tirant d'eau correspondant à cette cote à l'aval du canal d'amenée ;
- Q_{usine} : le débit de l'usine calculé à partir de Z_{usine} ;
- $Q_{deversoir}$: le débit du déversoir de décharge calculé à partir de Z_{usine} ;
- Q_{canal} : le débit total transitant par le canal d'amenée ;
- $Y_{barrage}$: le tirant d'eau calculé à l'amont du canal d'amenée à partir de Y_{aval} et Q_{canal} grâce à la courbe de remous.

TABLE 6.3 – Résultat des itérations de calcul du débit de l'usine par raccordement de la ligne d'eau

Itération	Z_{usine} (m)	Y_{aval} (m)	Q_{usine} (m ³ /s)	$Q_{deversoir}$ (m ³ /s)	Q_{canal} (m ³ /s)	$Y_{barrage}$ (m)
1	9,000	0,860	0,464	0,176	0,640	0,408
2	9,050	0,910	0,505	0,324	0,829	0,474
3	9,025	0,885	0,485	0,247	0,732	0,443
4	9,038	0,898	0,496	0,286	0,782	0,461
5	9,032	0,892	0,491	0,268	0,758	0,456
6	9,030	0,890	0,489	0,262	0,751	0,449

En choisissant une cote de 9,03 m au niveau du plan d'eau de l'usine, on obtient un tirant d'eau amont de 0,449 m au niveau du barrage très proche du tirant d'eau correspondant à la cote légale de 0,450 m. **Pour cette cote, le débit de l'usine correspondant est de 489 L/s.**

6.4.4 Conclusion

Les calculs ont été effectués avec les données topographiques fournies dans les plans datant de 1928 et en faisant les hypothèses suivantes :

- Le canal a une rugosité d'un canal en terre bien entretenu avec des murs maçonnés, soit un coefficient de Strickler de 50 ;
- Le coefficient de débit du déversoir de décharge C_d est égal à 0,4 (Valeur standard pour un déversoir à mince paroi) ;
- L'ajutage qui constitue les orifices des vannes motrices a un coefficient de débit C_d égal à 0,8 (Coefficient utilisé pour un ajutage long d'après [CARLIER, 1972](#)).

Lorsque le niveau dans la Sienne atteint le niveau du barrage de dérivation à la cote 9,10 m, le canal d'amenée débite 751 L/s. Le canal d'amenée débouche sur le plan d'eau de l'usine avec un niveau de l'eau à la cote 9,03 m. Le débit est alors réparti entre l'usine (489 L/s) et le déversoir de décharge (262 L/s).

Le débit à retenir pour le droit fondé en titre de l'usine est de 489 L/s.

7 Conclusion

La consistance légale définie dans le droit fondé en titre est calculée à partir du produit de la hauteur de chute maximum et du débit maximum dérivable. La définition du débit maximum dérivable, capitale aussi bien du point de vue du productible que du point de vue des impacts environnementaux, est le point qui pose le plus de problème à établir fidèlement.

Dans le présent guide méthodologique, nous avons d'abord défini les différents termes et leur implication dans le calcul du débit maximum dérivable (Sections 1.3 et 1.4). À partir des informations potentiellement disponibles selon les cas, trois méthodes ont été identifiées pour évaluer le débit maximum dérivable : l'exploitation de documents historiques, la mesure de débit in situ et la modélisation hydraulique. Même en dehors de la méthode d'évaluation du débit par modélisation hydraulique, on ne peut pas faire l'économie de compétences en hydraulique à surface libre. Notamment parce que la localisation de la section de contrôle du débit demeure capitale pour évaluer correctement le débit maximum dérivable (Voir Section 4.1 et tous les cas d'étude au Chapitre 6).

Au Chapitre 2, nous avons démontré que les données présentes dans les documents historiques, tels que les états statistiques où figurent des débits utilisés, ne devraient pas être écartés comme c'est trop souvent le cas dans la jurisprudence.

Au Chapitre 3, les conditions permettant la mesure de débit in situ ont été présentées. La mesure de débit ne pourra être utilisée de façon incontestable que dans le cas où il est avéré que le contrôle hydraulique ne se situe pas au niveau du moulin (cf. Section 3.1 et le cas d'étude Section 6.2), ou dans le cas où les organes historiques du moulin seraient encore présents (cas extrêmement rare).

Le Chapitre 4 explicite les méthodes de calcul du débit maximum dérivable en respectant les règles de l'art de l'hydraulique. Il écarte la méthode de calcul trop souvent utilisées consistant à utiliser une vitesse moyenne d'écoulement appliquée uniformément quel que soit le site étudié et il insiste sur l'importance de bien définir la section de contrôle (Section 4.1). Cette dernière devant être considérée dans l'état où elle devait être à l'époque de l'établissement du droit fondé en titre (Section 4.4). Ce chapitre méthodologique est complété par le Chapitre 5 qui est une boîte à outils fournissant toutes les formules nécessaires pour le calcul par modélisation hydraulique.

Le Chapitre 6 comprend 4 cas d'étude réels ayant des configurations très différentes reflétant des cas types classiquement rencontrés. Pour chacun des cas d'étude, une analyse critique du dossier existant est réalisée. Les différentes méthodes de calcul proposées dans la méthodologie sont mises à l'épreuve, afin de mettre en lumière lesquelles sont les plus pertinentes en fonction des différentes configurations rencontrées.

8 Bibliographie

- ARMENGAUD, E.-. (1858). *Traité théorique et pratique des moteurs hydrauliques (Nouvelle édition)*. Paris : l'auteur. URL : <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k5418098f> (visité le 22/02/2017).
- BAUME, J.-P., G. BELAUD et P.-Y. VION (2013). *Hydraulique pour le génie rural*. Formations de Master, Mastère Spécialisé, Ingénieur agronome. UMR G-EAU, Irstea, SupAgro Montpellier. 186 p. URL : http://hydraulique.g-eau.net/IMG/pdf/cours_hydraulique_g-eau2013.pdf.
- BELIDOR, B. F.d.-. (1737). *Architecture hydraulique, ou L'art de conduire, d'élever et de ménager les eaux pour les différens besoins de la vie. 1ère partie / Tome 1 / par M. Belidor,...* Paris : Charles-Antoine Jombert, Librairie de l'Artillerie et du Génie. 507 p. URL : <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k85682n> (visité le 08/06/2016).
- CARLIER, M. (1972). *Hydraulique générale et appliquée*. OCLC : 421635236. Paris : Eyrolles.
- CETMEF (2005). *Notice sur les déversoirs : synthèse des lois d'écoulement au droit des seuils et déversoirs*. Compiègne : Centre d'Études Techniques Maritimes Et Fluviales. 89 p. URL : http://www.side.developpement-durable.gouv.fr/EXPLOITATION/DEFAULT/doc/IFD/IFD_REFDOC_0513410/notice-sur-les-deversoirs-synthese-des-lois-d-ecoulement-au-droit-des-seuils-et-deversoirs (visité le 28/02/2017).
- DELAUNAY, C.-. (1852). *Cours élémentaire de mécanique théorique et appliquée (2e édition)*. ark :/12148/bpt6k99708p. Paris : V. Masson. URL : <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k99708p> (visité le 22/02/2017).
- EVANS, O. (1830). *Guide du meunier et du constructeur de moulins*. Avec la coll. de C. EVANS et T. ELLICOTT. Trad. par P.-M.-N. BENOIT. Paris : Malher et Cie. 642 p. URL : <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k663892>.
- LE COZ, J. et al. (2011). *Contrôle des débits réglementaires. Application de l'article L.214-18 du code de l'environnement*. Guides techniques de la police de l'eau. 132 p.
- MEEDDM (2010). *Guide pratique relatif à la police des droits fondés en titre*. Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer, p. 25. URL : http://www.bourgogne.ademe.fr/sites/default/files/files/Domaines%20d'intervention/EnR/Hydroelec/guide_droits_fondes_titre.pdf (visité le 17/02/2017).
- MINISTÈRE DES TRAVAUX PUBLICS (1905). « Circulaire du ministre des travaux publics aux ingénieurs en chef des ponts et chaussées (Routes et Navigation) - Atlas statistique des irrigations. » In : *Recueil de lois, ordonnances, décrets, règlements et circulaires concernant les différents services du Ministère des travaux publics : ancien Recueil Potiquet / dressé par les soins de l'Administration centrale*. ark :/12148/bpt6k5610131m. Paris : Jousset, p. 498–504. URL : <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k5610131m> (visité le 14/11/2017).
- MÜLLER, G. et K. KAUPPERT (2004). « Performance characteristics of water wheels ». In : *Journal of Hydraulic Research* 42.5, p. 451–460. ISSN : 0022-1686. DOI : [10.1080/00221686.2004.9641215](https://doi.org/10.1080/00221686.2004.9641215).

- RIBAUX, A. (1967). « Hydraulique appliquée ». In : URL : <https://infoscience.epfl.ch/record/24642> (visité le 12/04/2017).
- VIOLLET, P.-L. (2005). *Histoire de l'énergie hydraulique : moulins, pompes, roues et turbines de l'Antiquité au XXe siècle*. Paris, France : Presses de l'École nationale des ponts et chaussées, DL 2005. 232 p. ISBN : 978-2-85978-414-0.

9 Table des illustrations

9.1 Table des figures

1.1	Illustration de la hauteur maximale et de la hauteur nette	10
2.1	Schéma et photo d'une roue au dessus	15
2.2	Schémas de roues en dessous et de côté (Extrait de DELAUNAY, 1852)	16
2.3	Photo du rodet du moulin de Nougayrol à Castanet-le-Haut (Hérault) (Crédit : Castanet, licence : CC BY-SA 3.0)	17
2.4	Plan des moulins du Bazacle à Toulouse (Haute-Garonne) (Extrait de BELIDOR, 1737)	17
4.1	Plan de la topographie possible d'un moulin	22
4.2	Profil en long de la topographie possible d'un moulin	23
4.3	Schéma théorique représentant les différents régimes hydrauliques en écoulement à surface libre	24
4.4	Schémas des différents types de section de contrôle	25
4.5	Arbre de décision du calcul du débit maximum dérivable	27
4.6	Calculs successifs du débit permettant de raccorder la ligne d'eau à la cote normale de fonctionnement	28
4.7	Profil en long d'un moulin situé au droit du seuil	29
4.8	Profil en long d'un moulin avec vannes d'entrée du canal d'amenée en écoulement dénoyé	29
4.9	Schéma du profil en long d'un moulin avec un canal d'amenée limitant le débit	30
4.10	Schéma du profil en long d'un moulin où le débit est contrôlé par la vanne motrice et le canal d'amenée	31
4.11	Profil en long d'un moulin sans vanne motrice ni roue	33
4.12	Ouverture maximale de la vanne motrice pour les roues de côté et en dessous	33
5.1	Variables dans une section d'écoulement à surface libre (Extrait de BAUME, BELAUD et VION, 2013)	34
5.2	Formulaire de calcul du régime uniforme (Source : http://hydraulique.g-eau.net)	37
5.3	Exemple de calcul du débit en fonction de la pente en régime uniforme (Source : http://hydraulique.g-eau.net)	38
5.4	Schéma du problème du calcul d'une courbe de remous	38
5.5	Formulaire de calcul de la hauteur critique en fonction du débit (Source : http://hydraulique.g-eau.net)	40
5.6	Graphique du résultat du calcul de la hauteur critique en fonction du débit (Source : http://hydraulique.g-eau.net)	41
5.7	Formulaire de calcul d'une courbe de remous (Source : http://hydraulique.g-eau.net)	42

5.8	Calcul d'une courbe de remous avec un pas de discrétisation de 5 mètres (Source : http://hydraulique.g-eau.net)	43
5.9	Schéma d'un déversoir	44
5.10	Exemples de vannes où une formule de déversoir sera utilisée	44
5.11	Schémas explicatifs des écoulements noyés et dénoyés sur un seuil	45
5.12	Schémas explicatifs des écoulements à travers des orifices ou ajutages dé- noyés	47
5.13	Schéma d'une vanne de fond à l'amont d'une roue	47
6.1	Photographie aérienne du moulin de Roussel (Crédit : IGN)	49
6.2	Photographies du moulin de Roussel (Crédit : David Dorchies, Irstea)	50
6.3	Formulaire de calcul de la cote amont des vannes motrices du moulin de Roussel en fonction du débit (Source : http://hydraulique.g-eau.net)	52
6.4	Résultat du calcul de la cote amont des vannes motrices du moulin de Rous- sel en fonction du débit (Source : http://hydraulique.g-eau.net)	52
6.5	Formulaire de calcul de la courbe de remous dans le canal d'aménée du moulin de Roussel (Source : http://hydraulique.g-eau.net)	53
6.6	Résultat du calcul de la courbe de remous dans le canal d'aménée du moulin de Roussel (Source : http://hydraulique.g-eau.net)	54
6.7	Plan d'ensemble du site du moulin de Pont de Giret (Crédit : IGN)	56
6.8	Extrait de l'inventaire des usines et prises d'eau de 1906 où figure le moulin de Pont de Giret	57
6.9	Plan d'ensemble du site de l'usine Bourguignon (Crédit : IGN)	59
6.10	Photos du site de l'usine Bourguignon (Crédit : David Dorchies, Irstea)	60
6.11	Plan de situation	64
6.12	Profils du canal d'aménée (partie amont)	65
6.13	Profils du canal d'aménée (partie aval)	66
6.14	Plan des ouvrages régulateurs	67
6.15	Plan des ouvrages moteurs et du déversoir de décharge	68
6.16	Profil en long descriptif du moulin de Sienne	70
6.17	Schéma d'un ajutage du type du moulin de Sienne	71
6.18	Calcul du débit des orifices des vannes motrices en fonction de la hauteur d'eau mesurée entre la surface de l'eau et le centre de l'orifice	72
6.19	Schéma des étapes de calcul du débit	74
6.20	Formulaire de calcul de la courbe de remous du canal d'aménée pour une cote de plan d'eau de l'usine de 9,00 m	76
6.21	Graphique du résultat du calcul de la courbe de remous du canal d'aménée pour une cote de plan d'eau de l'usine de 9,00 m	77

9.2 Liste des tableaux

5.1	Tableau des calculs itératifs de l'exemple de calcul d'une courbe de remous	39
6.1	Résultat des calculs itératifs de calcul du débit maximum dérivable du moulin de Roussel	54
6.2	Résultat des itérations de calcul de la perte de charge du vannage des ou- vrages régulateurs de l'usine	72

6.3 Résultat des itérations de calcul du débit de l'usine par raccordement de la
ligne d'eau 77

10.1 Valeurs usuelles des coefficients de Strickler 92

10 Annexes

10.1 Tables de conversions

La puissance utilisée pour le calcul de la consistance légale est le kilo Watt (kW). Les documents historiques peuvent utiliser d'autres unités de mesure qu'il est nécessaire de convertir.

10.1.0.1 Le cheval-vapeur (CV)

Un cheval-vapeur représente la puissance équivalente à celle d'un cheval soulevant (verticalement) un poids de 75 kg à une vitesse de 1 m/s, soit 735,498 W. (Extrait : Wikipédia)

$$P_{kW} = 0.735P_{CV} \quad (10.1)$$

Avec :

- P_{kW} la puissance en kilo Watts ;
- P_{CV} la puissance en chevaux-vapeur.

10.1.0.2 Le poncelet

Le poncelet est une ancienne unité de puissance valant la puissance d'une force de 100 kilogramme-forces exercée à une vitesse d'un mètre par seconde. 1 p = 980,665 watts. Cette unité a été nommée d'après Jean-Victor Poncelet. (Extrait : Wikipédia)

$$P_{kW} = 0.981P_p \quad (10.2)$$

Avec :

- P_{kW} la puissance en kilo Watts ;
- P_p la puissance en poncelet.

10.2 Arrêt Ulrich du Conseil d'État du 28 juillet 1866

10.2.1 Notice du document

Titre : Recueil des arrêts du Conseil d'État

Auteur : France. Conseil d'État (1799-....). Auteur du texte

Éditeur : Delhomme (Paris)

Date d'édition : 1866

Contributeur : Gauté, du Gers. Directeur de publication

Contributeur : Lebon, Félix. Directeur de publication

Contributeur : Hallays-Dabot, A.. Directeur de publication

Type : texte

Type : publication en série imprimée

Langue : français

Description : 1866 (SER2,T36).

Droits : domaine public

Identifiant : ark :/12148/bpt6k5733552w

Source : Bibliothèque nationale de France, département Droit, économie, politique, 8-F-606

Relation : <http://catalogue.bnf.fr/ark:/12148/cb343630608>

Provenance : Bibliothèque nationale de France

Date de mise en ligne : 01/12/2010

10.2.2 Texte de la décision du Conseil d'État

COURS D'EAU NON NAVIGABLES. — DOMMAGES AUX USINES. — CONSISTANCE LÉGALE DE L'USINE. — TRAVAUX EXTÉRIEURS NON AUTORISÉS ET CONSTITUANT UN MEILLEUR EMPLOI MAIS NON UNE AUGMENTATION DE LA FORCE MOTRICE. — INDEMNITÉ DE DÉPRÉCIATION. AMÉLIORATIONS POSSIBLES DANS LE MÉCANISME DE L'USINE.

Lorsqu'une usine existait antérieurement à 1790, — d'où la conséquence que son établissement est légal et que son propriétaire se trouve dans les conditions exigées par l'art. 48 de la loi du 16 septembre 1807 pour obtenir indemnité en cas de chômage causé par des travaux publics ; — que depuis 1790 il n'a rien été changé aux ouvrages régulateurs de la retenue de l'usine, ni au régime des eaux de la rivière ; — mais que, sans accroître la force motrice dont il pouvait légalement disposer, le propriétaire *l'a mieux utilisée au moyen d'additions et de perfectionnements apportés sans autorisation administrative aux vannes motrices, aux coursiers et aux roues hydrauliques* — doit-on, dans le règlement de l'indemnité, considérer les vannes motrices, les coursiers et les roues hydrauliques comme existant légalement dans l'état où ils se trouvent au moment du chômage pour travaux publics ? — *Rés. aff.* — 1^{re} esp.

En est-il ainsi, alors même que, pour mieux utiliser la force motrice, le propriétaire a, sans autorisation administrative, augmenté le nombre des tournants ? — *Rés. aff.* — 2^e esp.

— (Il est reconnu par le ministre des travaux publics, qu'aucune disposition de loi ou de règlement n'oblige les usiniers à se pourvoir d'une autorisation, *soit* pour modifier les vannes motrices, coursiers et roues hydrauliques, *soit même* pour augmenter le nombre des roues de leurs usines.)(1)

— Un propriétaire d'usine auquel est accordée une indemnité de dépréciation pour diminution de force motrice causée par des travaux publics, est-il fondé à demander qu'il lui soit tenu compte de l'accroissement de force motrice *qu'il aurait pu obtenir ultérieurement*

au moyen d'améliorations à introduire dans le mécanisme de son usine ? — *Rés. nég.* — (Lorsque tout ou partie de la force motrice d'une usine lui est enlevée par suite de l'exécution d'un travail public, l'indemnité due au propriétaire doit être calculée d'après le préjudice qu'il éprouve par la privation de la force motrice *dont il faisait usage.*) 1^{re} et 3^e esp. (2).

1^{re} ESP. (36,644.-28 juillet. *Ulrich (Philippe).*-MM. Aubernon, *rap.*- Aucoc, *c. du g.* ; Michaux-Bellaire, *av.*)

VU LES REQUÊTES LES REQUÊTES... pour le sieur Philippe Ulrich, propriétaire de l'usine de Weyersheim, sur la rivière la Zorn... tendant à ce qu'il nous plaise réformer — un arrêté, du 31 mai 1864, par lequel le cons. de pref. du Bas-Rhin a condamné l'État à lui payer : 1^o une indemnité de 14,844 fr. 79 c. à raison des chômages éprouvés par son usine depuis le 1^{er} janv. 1853 jusqu'au 31 déc. 1861 ; — 2^o une indemnité de 32,988 fr. 40 c. à raison des chômages qu'elle a éprouvés depuis le 31 déc. 1861, et qu'elle éprouvera dans l'avenir, par suite des prises d'eau établies dans la rivière la Zorn pour l'alimentation du canal de la Marne au Rhin ; — Ce faisant, attendu que ces indemnités seraient insuffisantes, les élever, la première à la somme de 40,000 francs, et la seconde à la somme de 80,000 francs et condamner l'Etat aux dépens ;

Vu les observ. du Min. des trav. pub. tendant à ce qu'il nous plaise *rejeter* le pourvoi, *attendu* que l'arrêté attaqué aurait fait une juste appréciation des dommages éprouvés par l'usine et de ceux qu'elle éprouvera dans l'avenir par suite des prises d'eau du canal de la Marne au Rhin ;

Vu les lois du 28 pluv. an 8 et du 10 sept. 1807 ;

EN CE QUI TOUCHE *la consistance légale de l'usine de Weyersheim* : — Considérant qu'il résulte de l'instruction que cette usine existait antérieurement à 1790 ; que, dès lors, son établissement est légal et qu'ainsi le sieur Ulrich se trouve dans les conditions exigées par l'art. 48 de la loi du 16 sept. 1807, pour que les propriétaires d'usine aient droit à une indemnité ; ,

Cons. que, depuis 1790, il n'a rien été changé aux ouvrages régulateurs de la retenue de ladite usine, ni au régime des eaux de la rivière la Zorn, et que, sans accroître la force motrice dont il pouvait légalement disposer, le sieur Ulrich n'a fait que la mieux utiliser au moyen d'additions et de perfectionnements apportés aux vannes motrices, aux coursiers et aux roues hydrauliques :—" qu'il est reconnu par notre Min. des trav. pub. qu'aucune disposition de loi ou de règlement n'oblige les usiniers à se pourvoir d'une autorisation pour modifier les ouvrages précités ; — que, dès lors, c'est à tort que le cons. de préf. a refusé de considérer les vannes motrices, les coursiers et les roues hydrauliques de l'usine de Weyersheim comme existant légalement dans l'état où ils se trouvaient au moment de l'établissement du canal de la Marne au Rhin ;

En ce qui touche l'indemnité afférente aux chômages éprouvés par l'usine jusqu'au 31 déc. 1861 : — Cons. qu'il résulte de l'instruction qu'il sera fait une juste appréciation du préjudice que ces chômages ont causé au sieur Ulrich, en fixant l'indemnité qui lui est due à la somme de 30,333 fr. 24 c, laquelle portera intérêt à son profit, pour 27,140 fr. 66 c. à partir du 16 août 1861, et pour le surplus à partir du 31 déc. 1861 ;

En ce qui touche l'indemnité de dépréciation évaluée en capital : — Cons. que, lorsque tout ou partie de la force motrice d'une usine lui est enlevée, par suite de l'exécution d'un travail public, l'indemnité qui est due au propriétaire de ladite usine doit être calculée d'après le préjudice qu'il éprouve par la privation de la force motrice dont il faisait usage : que, dès lors, le sieur Philippe Ulrich n'est pas fondé à demander qu'il lui soit tenu compte de l'accrois-

sement de force motrice qu'il aurait pu obtenir ultérieurement, au moyen d'améliorations à introduire dans les mécanismes de son usine ;

Cons. qu'il résulte de l'instruction qu'il sera fait une juste appréciation, du préjudice que causeront à l'avenir au sieur Ulrich les prises d'eau du canal de la Marne au Rhin, eu égard à l'état actuel de la navigation, en fixant l'indemnité de dépréciation qui lui est due, à la somme de 55,195 fr. 40 c, laquelle portera intérêt à son profit à partir du 31 déc. 1861.

Art. 1^{er}. L'Etat est condamné à payer au sieur Philippe Ulrich : — 1° à raison des chômages éprouvés par l'usine de Wegersheim jusqu'au 31 déc. 1861, une indemnité de 30,533 fr. 24 c, laquelle portera intérêt à son profit, pour 27,140 fr. 66 c, à partir du 16 août 1861 et pour le surplus à partir du 31 déc. 1861 ; — 2° à raison des chômages que l'usine a éprouvés depuis le 31 déc. 1861, et de ceux qu'elle éprouvera à l'avenir, eu égard à l'état actuel de la navigation dans le canal de la Marne au Rhin, une indemnité de dépréciation de 53,193 fr. 40 c. laquelle portera intérêt à partir du 31 déc. 1861... (Arrêté réformé en ce qu'il a de contraire. Rejet du surplus des conclusions du demandeur. Etat condamne aux dépens.)

Même date, arrêt semblable, n° 36,691 [Chrétien Ulrich).

10.2.3 Conclusions du rapporteur public

(1 et 2) V. 5 juillet 1855 (p. 496, Beaufrère). Cet arrêt, dont on va trouver le sens dans les observations du commissaire du gouvernement, a été le point de départ d'une jurisprudence que viennent compléter les arrêts actuels, jurisprudence qui nous paraît reposer tout à la fois sur un sentiment d'équité envers les propriétaires d'usine et sur une véritable intelligence des intérêts de l'Etat. — Pour l'Etat, auquel profite de mille manières l'augmentation de la richesse publique, le bon emploi des forces motrices est un intérêt de premier ordre, et pour que les propriétaires d'usines ne reculent pas devant les dépenses sans lesquelles ils ne peuvent tenir leurs établissements au niveau des perfectionnements industriels, il faut qu'ils puissent compter sur une équitable réparation des dommages causés à ces établissements par les travaux publics.

Voici les observations présentées sur ces importantes affaires par M. le commissaire du gouvernement Aucoc¹ :

Le sieur Ulrich (Chrétien) demande une double indemnité à raison du préjudice que lui font subir les prises d'eau effectuées par l'Etat dans la Zorn pour l'alimentation du canal de la Marne au Rhin : — indemnité pour les chômages temporaires causés à son usine ; — indemnité pour la dépréciation que subira celle même usine par suite du retour annuel et certain des mêmes chômages.

Avant d'entrer dans le détail des questions de fait que soulève cette affaire nous devons examiner deux questions de droit qui la dominent.

La première est la question de savoir s'il doit être tenu compte à l'usinier de la totalité de la force motrice dont il jouissait au moment où les prises d'eau effectuées par l'Etat sont venues la réduire.

L'usine du sieur Ulrich, située sur la Zorn, rivière qui n'est ni navigable, ni flottage, a une origine bien antérieure à 1790 ; elle a une existence légale incontestée. Mais la force motrice actuelle de l'usine est supérieure à celle dont l'usinier

1. précautions de lecture : les conclusions sont ici reprises dans leur intégralité pour bien faire ressortir le raisonnement du rapporteur en matière de différenciation entre puissance disponible et puissance brute, cela ne préjuge en rien de la validité de toutes les affirmations avancées par ailleurs, au regard de l'état du droit de l'eau et de l'environnement en 2017.

jouissait en 1790. Ce n'est pas que le volume ni la hauteur de la chute d'eau aient été augmentés. Mais la position et la largeur des roues ont été modifiées. La vanne motrice est inclinée au lieu d'être verticale ; il s'en suit que les roues rendent 27 p. 100 au lieu de 15 p. 100. Les changements apportés à la situation des roues et de la vanne motrice ayant été opérés sans autorisation de l'administration, le conseil de préfecture a décidé qu'il ne devait pas être tenu compte du supplément de force motrice qui résultait de ces changements irréguliers.

Nous ne dissimulerons pas que cette décision du conseil de préfecture est conforme à plusieurs de vos décisions.

Mais nous vous demandons la permission d'examiner si celle jurisprudence est conforme aux principes. Cette liberté, que vous n'avez jamais refusée à nos prédécesseurs, est surtout nécessaire lorsqu'il s'agit de la matière des cours d'eau, matière où la jurisprudence a dû si souvent suppléer aux nombreuses lacunes de la législation ; et les progrès considérables que vous avez faits depuis quinze ans dans la voie de l'équité nous imposent la confiance que vous ne refuserez pas de faire un nouveau progrès dans le même sens.

Vous n'avez pas oublié qu'il y a quinze ans, l'administration des travaux publics soutenait d'une manière radicale que, dans le cas où elle privait une usine avant une existence légale d'une partie de sa force motrice, elle ne devait indemniser l'usinier qu'en raison de la valeur de l'usine, telle qu'elle était au moment de sa constitution légale, par exemple en 1790 pour les usines situées sur les cours d'eau non navigables, et non en raison de la valeur de l'usine au moment où le dommage était causé. Elle prétendait ne tenir aucun compte des modifications introduits postérieurement sans autorisation, soit dans les ouvrages intérieurs, soit dans les ouvrages extérieurs.

Vous avez fait une première distinction. Vous avez reconnu, en 1851, que si l'usinier, par la transformation intérieure de l'usine, par l'affectation de son moteur à une industrie plus lucrative que l'industrie exercée en 1790, par la simplification et l'amélioration du mécanisme intérieur avait augmenté la valeur de son usine, il avait droit à être indemnisé en raison de la valeur qu'il avait créée par ces transformations, sans qu'il y eut à rechercher s'il avait été autorisé à les faire. Il vous a paru évident qu'un usinier n'avait pas besoin d'autorisation pour modifier les ouvrages intérieurs de son usine qui ne peuvent avoir aucune influence sur le cours de l'eau.

Mais en même temps, vous décidiez qu'il en était autrement lorsque l'usinier avait augmenté la valeur de son usine par des changements apportés sans autorisation aux ouvrages extérieurs. Et ici vous ne distinguez pas entre la surélévation du barrage qui créait la chute d'eau et la modification des roues qui sont mises en mouvement par la chute d'eau. Tout changement aux ouvrages extérieurs vous paraissait irrégulier, s'il n'avait pas été autorisé. » Cette jurisprudence, établie par d'assez nombreuses décisions, n'est-elle pas trop absolue ? nous croyons pouvoir l'établir.

Dans la force motrice que procurent à une usine ce qu'on appelle ses ouvrages extérieurs, il faut distinguer deux choses : la force motrice brute qui résulte du volume, de la hauteur et de la pente de la chute d'eau, et la force utile qui tient à l'état du mécanisme extérieur : roues, coursiers, etc. La force utile peut augmenter par un perfectionnement du mécanisme extérieur sans que la force brute ait été modifiée.

Vous avez déjà reconnu l'exactitude de cette distinction dans deux affaires jugées

le 5 juillet 1855 (Beaufrère) et le 29 janvier 1857 (Flusin). A cette époque vous admettiez que la clause des règlements d'usine qui dénie tout droit à indemnité en cas de privation totale ou partielle de la force motrice était valable pour les usines situées sur les cours d'eau non navigables. Et cependant vous n'admettiez pas qu'on pût l'opposer à l'usinier pour les modifications apportées aux coursiers, aux roues, et qui, sans augmenter la force motrice brute de l'usine, lui avaient permis de tirer un meilleur parti de la force qui se trouvait à sa disposition. Toutefois, il fallait, d'après ces deux décisions elles-mêmes, que ces modifications eussent été autorisées.

Mais cette autorisation est-elle nécessaire pour toutes les modifications quelconques apportées aux ouvrages extérieurs des usines ? Y a-t-il une disposition de loi ou de règlement en vigueur qui la prescrive ?

Nous n'en connaissons pas. Les dispositions si fréquemment citées des lois des 12-20 août 1790 et des 28 septembre-6 octobre 1791 ont chargé l'administration de veiller au libre cours des eaux, de diriger les eaux vers un but d'utilité générale d'après les principes de l'irrigation et de fixer la hauteur des barrages des usines à un niveau tel que la retenue d'eau ne nuise pas aux propriétés riveraines en les inondant.

Il suit de là que nul ne peut établir ou modifier sans l'autorisation de l'administration un ouvrage qui aurait une action sur le cours des eaux, qui en arrêterait le cours, qui en détournerait une certaine partie. Ainsi un barrage, une prise d'eau ne peuvent être établis sans autorisation.

Mais quand une fois le barrage est autorisé, pourquoi l'administration aurait-elle à autoriser les ouvrages qui doivent utiliser la chute d'eau que procure le barrage ? L'administration n'a pas à fixer la dimension ou la disposition des roues et du coursier, pas plus qu'elle n'a à décider que l'usine sera un moulin à farine ou une filature. Dans l'un comme dans l'autre cas, il ne s'agit plus de créer une chute d'eau, il ne s'agit que de l'utiliser. L'usinier doit être libre de faire ce qu'il juge le plus avantageux, parce que sa décision ne peut en rien nuire à l'intérêt public confié aux soins de l'administration.

C'est ce que l'administration des ponts et chaussées a reconnu depuis longtemps.

En 1818, une commission d'inspecteurs généraux avait soumis au conseil général des ponts et chaussées, qui l'avait adopté, un projet d'instruction ministérielle résumant les traditions suivies en matière de règlement d'usine. Le projet n'a pas été converti, à cette époque, en instruction ministérielle ; mais il a été autographié et distribué aux ingénieurs ; il a été reproduit par M. Tarbé de Vaublains, dans son Dictionnaire des travaux publics ; il servait de règle à l'administration. Or, nous trouvons dans l'art. 35 : « L'ingénieur ne doit pas s'immiscer dans le calcul des effets de l'usine projetée, n'étant pas appelé à donner son avis sur les qualités bonnes ou mauvaises de cette usine ; il ne fixe pas les dimensions de la roue motrice, ni celle d'aucune partie du mécanisme ou de l'édifice destiné à le recevoir. »

Ces traditions sont expressément consacrées par l'instruction ministérielle du 23 octobre 1851 :

Après avoir posé les règles à suivre pour déterminer le niveau légal de la retenue et pour l'établissement des ouvrages régulateurs, c'est-à-dire du déversoir de superficie et des vannes de décharge, le ministre arrive à ce qui concerne les vannes motrices, les coursiers et les roues hydrauliques, et voici comment il

s'exprime : « Sur les rivières non navigables ni flottables, hors les cas de partage d'eau dans lesquels l'administration peut être appelée à déterminer la situation respective des divers intéressés, les dimensions des roues motrices doivent être laissées à l'entière disposition des permissionnaires ; il n'y a pas lieu non plus d'imposer l'établissement de vannes de prises d'eau en tête des dérivations, ni de fixer la largeur et la pente des canaux de dérivation, toutes les fois qu'il n'est pas reconnu nécessaire, dans » l'intérêt des propriétaires riverains ou par suite de quelque disposition locale, de régler l'introduction des eaux dans ces canaux. *MM. les ingénieurs* » n'ont, d'ailleurs, en aucun cas, à régler la chute de l'usine ni les dispositions du coursier et de la roue hydraulique. »

Comment donc pourrait-on reprocher à un usinier d'être en faute, pour n'avoir pas demandé l'autorisation de modifier son coursier, sa roue, et même, dans certains cas, sa vanne motrice, puisque l'administration pose en règle qu'elle n'a pas à s'occuper de la disposition des coursiers et des roues et interdit à ses agents de les régler !

L'administration ne peut avoir deux langages. Elle ne peut pas dire aux usiniers : modifiez vos coursiers, vos roues ; tirez le parti le plus utile de la force motrice mise à votre disposition, je vous laisse complètement libres ; et puis, quand viendrait le jour de la liquidation d'une indemnité due à un usinier, changer de thèse et dire : Les modifications apportées à vos roues n'ont pas été autorisées, je n'en tiens pas compte.

M. le ministre des travaux publics doit donc renoncer à réclamer le bénéfice d'une jurisprudence fondée sur un motif dont nous avons démontré et dont il reconnaît lui-même l'inexactitude.

Dans l'espèce, il est établi par les experts que l'usinier n'a pas élevé le niveau de la retenue telle qu'elle existait en -1790. Il s'est borné à utiliser la force motrice qui était à sa disposition, en modifiant la largeur et la position des roues et en inclinant la vanne motrice dont les dimensions n'intéressaient pas l'administration, puisque l'usine occupe les deux rives d'un cours d'eau non navigable. Sa situation n'est donc pas irrégulière, et il doit lui être tenu compte de la totalité de la force motrice dont il dispose.

Une seconde question de droit est soulevée par le sieur Ulrich. Selon lui les bases de l'indemnité ne peuvent pas être les mêmes pour les chômages temporaires et pour les dépréciations définitives de l'usine.

Dans le premier cas, c'est la force motrice actuellement utilisée qui doit servir de base ; mais dans le second cas, il doit être tenu compte à l'usinier de toute la force motrice que pouvait donner sa chute si son mécanisme extérieur avait reçu tous les perfectionnements possibles.

Ici nous ne pouvons être d'accord avec le requérant. Nous reconnaissons bien qu'il n'avait pas besoin de permission pour faire à sa roue, à son coursier toutes les modifications nécessaires afin de les perfectionner.

Mais c'est une faculté qu'il avait ; ce n'est pas un droit acquis. En le privant d'une partie de l'eau dont il aurait pu mieux profiter, l'Etat lui enlève une espérance et non un bien réalisé. Où s'arrêterait-on, d'ailleurs, dans la voie des possibilités et des hypothèses ?

La valeur dont une partie a été enlevée au requérant, c'est la force motrice actuelle, ou du moins la force motrice utilisée dans l'usine au moment où l'Etat a commencé les prises d'eau : la justice ne permet pas de prendre une autre base pour l'indemnité.

10.3 La méthode de dichotomie appliquée au calcul du débit maximum dérivable

Cette méthode peut être utilisée pour résoudre le calcul du débit maximum dérivable dans les cas où il n'existe pas de solution directe au problème. Les méthodes exposées dans les Sections 4.3.2, 4.3.3 et 4.2.2 procèdent toutes de la même manière : on effectue un essai de calcul de la cote de l'eau au niveau du seuil de dérivation avec un débit hypothétique Q et on compare ensuite la cote de l'eau obtenue Z avec la cote normale de fonctionnement Z_{norm} . La méthode de dichotomie rationalise le choix du débit utilisé de façon à faire converger la cote de l'eau obtenue Z vers la cote normale de fonctionnement Z_{norm} .

Voici une description de la méthode :

- ① Choisir une marge d'erreur acceptable de débit ΔQ (exemple 1 m³/s).
- ② Choisir un intervalle ayant pour limites un débit minimum Q_{min} et un débit maximum Q_{max} dans lequel on suppose que se trouve le débit maximum dérivable Q .
- ③ Calculer la cote de l'eau au niveau du seuil de dérivation Z_{min} pour Q_{min} et Z_{max} pour Q_{max} . On doit normalement avoir $Z_{min} < Z_{norm} < Z_{max}$. Si ça n'est pas le cas, il faut retourner à l'étape ②.
- ④ Calculer le débit médian Q_{med} entre Q_{min} et Q_{max} avec la formule $Q_{med} = (Q_{min} + Q_{max})/2$.
- ⑤ Calculer la cote de l'eau au niveau du seuil de dérivation Z_{med} pour Q_{med} .
- ⑥ Si $(Q_{max} - Q_{min})/2 < \Delta Q$ alors le calcul est terminé et le débit maximum dérivable Q est égale à Q_{med} .
- ⑦ Comparer Z_{med} par rapport à Z_{norm} , et mettre à jour Q_{min} ou Q_{max} en conséquence :
 - si $Z_{med} < Z_{norm}$ alors $Q_{min} = Q_{med}$;
 - si $Z_{med} > Z_{norm}$ alors $Q_{max} = Q_{med}$;
- ⑧ Retourner à l'étape ④.

10.4 Valeurs de coefficients de Strickler

Valeurs usuelles indicatives.

Sources : notice d'utilisation du logiciel Canal9 (CEMAGREF), Abaques de calculs d'hydraulique à surface libre -tome I : texte - tome II : abaques CTGREF (1971)

TABLE 10.1 – Valeurs usuelles des coefficients de Strickler

Type de surface	Coefficient de Strickler K (m ^{1/3} /s)
Canaux artificiels, galeries ou conduites a surface libre	
Surfaces très lisses et sans saillies, tracé suffisamment droit ; Ex : verre neuf et net, pyroline-cuivre	100 à 110

<i>Type de surface</i>	<i>Coefficient de Strickler K (m^{1/3}/s)</i>
<p>Surfaces très lisses, sans saillies ; tracé suffisamment droit</p> <ul style="list-style-type: none"> - bois net raboté - métal soudé non peint - ciment mortier ou béton bien lissé, bien soigné et sans débris - surfaces très lisses avec courbures moyennes 	80-90
<p>Surfaces avec légères aspérités</p> <ul style="list-style-type: none"> - acier riveté ou peint - fer forgé ou coulé - bois non raboté - ciment et mortier - finition à la truelle - béton coffré avec de l'acier ou du bois lisse sans débris et pas de courbures - canaux en béton très lisse avec joints - tuyau de drainage ordinaire - égout vitrifié sans saillie - brique vernissée, grès - asphalte lisse - moellons dressés avec joints cimentés - surfaces lisses ou très lisses avec fortes courbures 	70-80
<p>Surfaces avec aspérités moyennes</p> <ul style="list-style-type: none"> - métal incrusté - métal riveté avec rivets grossiers - canaux en métal avec larges saillies vers l'intérieur - bois très grossier (madriers) - béton avec bord lisse et fond rugueux - petit canal en béton, assez droit et régulier dont la surface est recouverte d'un léger dépôt - bois ou béton avec développement d'algues et de mousses - égouts avec regards - drains enterrés avec joint ouvert - terre particulièrement régulière 	≈ 65

<i>Type de surface</i>	<i>Coefficient de Strickler K (m^{1/3}/s)</i>
<ul style="list-style-type: none"> - canaux avec plafond en sable fin (surfaces non ridées) - surfaces lisses avec courbes excessives 	
<p>surfaces rugueuses</p> <ul style="list-style-type: none"> - métal très incrusté - béton coulé non lissé - béton coulé aux coffrages en bois rugueux - béton très rugueux ou vieux - maçonnerie vieille ou mal soignée - canaux en maçonneries moyenne avec joints nombreux ou nombreuses courbes - bois ou béton avec développement dense d'algues ou de mousse - canaux en terre très régulière, état neuf, bon alignement - sable moyen - pierres dressées, joints cimentés 	55-60
<p>Surfaces très rugueuses</p> <ul style="list-style-type: none"> - canaux en métal avec très fortes saillies vers l'intérieur ou fortes courbures, ou développement de végétation importante ou débris accumulés - canaux en béton avec maçonnerie en très mauvais état ou très grossière - canaux très larges en gravier fin plus sable ou en terre régulière meuble, sans développement de végétation - radiers pavés - moëllons bruts assemblés au ciment <p>Surfaces à rugosité très importante</p> <ul style="list-style-type: none"> - lit en gravier fin - canaux avec dépôts ou végétation - canaux en terre moyenne, dimensions modérées - moëllons bruts grossièrement assemblés au ciment 	<p>≈ 50</p> <p>≈ 45</p>
<p>Surfaces assez grossières</p> <ul style="list-style-type: none"> - aqueducs métalliques à section semi-circulaire en tôle plissée - terre en mauvais état 	

<i>Type de surface</i>	<i>Coefficient de Strickler K (m^{1/3}/s)</i>
<ul style="list-style-type: none"> - graviers moyens - canaux en terre, petites dimensions - canaux en terre, plus larges avec développement de végétation ou gros galets ou pierres dispersées - fossés en bon état - canaux en terre sinueux, sans végétation - blocage cimenté - béton sur roche régulièrement excavée 	≈ 40
<p>Surfaces grossières</p> <ul style="list-style-type: none"> - excavation rocheuse très régulière - gros gravier - pierre sèche - canaux en terre, dragués, sans végétation ou enherbés - chenaux d'évacuation de crue, larges et entretenus - béton sur roche irrégulièrement excavée - canaux et fossés avec nombreuses pierres lisses - canaux et fossés avec pierres rugueuses au fond et végétation sur les bords 	35
<p>Surfaces très grossières</p> <ul style="list-style-type: none"> - excavations rocheuses uniformes - canaux avec développement considérable de végétation - chenaux d'évacuation de crues, larges mais peu entretenus - blocage sec - canaux en terre sinueux avec mauvaises herbes plus ou moins denses ou plantes aquatiques - canaux en terre sinueux avec fond en terre et berges en blocage au fond pierreux et berges recouvertes de mauvaises herbes 	30
<p>Surfaces excessivement grossières</p> <ul style="list-style-type: none"> - excavation rocheuses irrégulières - canaux en terre en très mauvais état, très sinueux avec pierres rugueuses et végétation importante - lits majeurs d'évacuation de crue dégagés, mais entretenus de façon discontinue 	25

<i>Type de surface</i>	<i>Coefficient de Strickler K (m^{1/3}/s)</i>
Canaux avec végétation dense	
- canaux non entretenus, mauvaises herbes et broussailles coupées	20
- canaux avec mauvaises herbes denses aussi hautes que la hauteur de l'écoulement	12
- fond net, broussailles sur les berges	15-20
- broussailles très denses, niveau d'eau élevé	10
Cours d'eau naturels	
Petits cours d'eau (largeur maximale inférieure à 30 m)	
a) cours d'eau de plaine	
- net, droit, niveau d'eau élevé, peu de variations de la section mouillée	30-40
- idem, mais pierres et mauvaises herbes plus nombreuses	30
- net, sinueux avec seuils et mouilles	25
- idem, mais avec pierres et mauvaises herbes	20
- idem, mais niveau bas	20
- cours paresseux, mauvaises herbes, trous d'eau profonds	15
- nombreuses mauvaises herbes et nombreux trous d'eau	10
- pente et fond irréguliers, nombreuses souches, arbres et buissons, arbres tombés dans la rivière	5 à 7
b) cours d'eau de montagne	
Pas de végétation dans le lit, rives escarpées, arbres et broussailles pour les niveaux élevés	
- fond en gravier et cailloux, peu de gros galets	25
- fond avec gros graviers	20
Plaines d'inondation	
- pâturages sous broussailles	30 à 35
- zones cultivées, absence de récoltes	35
- zones cultivées, récoltes sur pied	25 à 30
- broussailles dispersées et mauvaises herbes ou broussailles et quelques arbres en hiver	20
- quelques arbres et broussailles en été ; broussaille moyenne ou dense en hiver	15

Type de surface	Coefficient de Strickler K ($m^{1/3}/s$)
- broussaille moyenne ou dense en été	10
- souches d'arbres sans rejet	25
- souches d'arbres avec rejets durs	16
- forêt de hautes futaies ; peu de broussailles	10
- idem, avec niveau d'eau atteignant les branches	8
- souches denses	7
Grands cours d'eau (largeur maximale supérieure à 30 mètres)	
La valeur de K est supérieure à celle des petits cours d'eau d'allure analogue, car les rives offrent moins de résistance efficace.	
- section régulière sans broussailles	25 à 40
- section irrégulière et rugueuse	10 à 25

10.5 Équation différentielle de calcul d'une courbe de remous

L'équation différentielle permettant de calculer une courbe de remous est la suivante :

$$\frac{dh}{dx} = \frac{I_f - J}{1 - F^2} \quad (10.3)$$

Avec :

- h la hauteur d'eau (en mètre) ;
- x l'abscisse longitudinale ;
- I_f la pente du fond (en m/m) ;
- J la perte de charge (en m/m) ;
- F le nombre de Froude.

La perte de charge J se calcule à l'aide de la formule de Manning Strickler (Voir Equation 5.5) qui devient :

$$J = \frac{Q^2}{K^2 S^2 R_h^{4/3}} \quad (10.4)$$

Le nombre de Froude F qui permet de caractériser la différence entre un écoulement fluvial ($F < 1$) et un écoulement torrentiel ($F > 1$) se calcule avec la formule :

$$F = \sqrt{\frac{Q^2}{gB^2}} \quad (10.5)$$

Avec :

- Q le débit en m^3/s ;
- g l'accélération de la pesanteur terrestre $g = 9.81 \text{ m/s}^2$;
- B la largeur au miroir en mètres.

L'équation 10.3 permet de calculer la pente de la ligne d'eau en un point. Le calcul de la ligne d'eau va donc consister à partir d'un point de départ (à l'aval en écoulement fluvial et à l'amont en écoulement torrentiel), de calculer la pente de l'eau et de tracer un segment du point initial jusqu'à un point raisonnablement proche en prenant en compte cette pente. Ce calcul est réitéré jusqu'à obtention du point final à l'amont ou à l'aval respectivement pour un régime fluvial ou torrentiel.



Irstea
1, rue Pierre-Gilles de Gennes
CS 10030
92761 Antony Cedex
01 40 96 61 21
www.irstea.fr

**AGENCE FRANÇAISE
POUR LA BIODIVERSITÉ**

ÉTABLISSEMENT PUBLIC DE L'ÉTAT

AFB
Hall C – Le Nadar
5, square Félix Nadar
94300 Vincennes
01 45 14 36 00
www.afbiodiversite.fr